

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DE M'HAMED BOUGARA – BOUMERDES



Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département de Génie Des Matériaux

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme Master
Spécialité : Génie de matériaux

THEME

EFFET DU MODE D'INTRODUCTION DE LA NANO-SILICE SUR LES PROPRIETES DES BETONS FIBRES ULTRA HAUTE PERFORMANCES

Réalisé Par :

HADDADI Abderrahim
CHAOU Hemza

Sujet Proposé et suivi par :

Dr. K. CHAHOUR
Dr. SAFI B.

CHAHOUR K.

MCB

U. TIZI OUZOU

Encadreur

SAFI B.

MCA

U. BOUMERDES

Co-Encadreur

Boumerdes 2016 – 2017

Résumé:

Récemment, la nanotechnologie a attiré un intérêt scientifique considérable en raison des nouvelles utilisations potentielles des nano-particules, qui peuvent améliorer considérablement les propriétés des bétons, telles que la Nanosilice. Les nanoparticules comme nano silice, ont présentés des propriétés physiques et chimiques uniques différentes à celles des ajouts cimentaires conventionnels. Les nano-silices ont été utilisées soit pour remplacer une partie des ciments soit comme addition afin d'améliorer les performances du ciment telle que l'accélération de l'hydratation des phases de ciment (b-C2S et C3S). Néanmoins, le mode d'introduction de ce type d'ajout toujours des problèmes de maniabilité du béton. A cet effet, le but de ce travail est d'étudier l'effet du mode d'introduction de la nano-silice sur les propriétés à l'état frais et durci des bétons fibres ultra haute performances.

Mots-clés : Nano-silice, ciment, super-plastifiant, béton fibré, BUHP, résistance, compression, contrainte-déformation.

Abstract:

Recently, nanotechnology has attracted considerable scientific interest because of the potential new uses of nano-particles, which can be greatly improved properties of concretes, such as Nanosilica. Nanoparticles such as Nanosilica have exhibited unique physical and chemical properties different from conventional cementitious additions. Nanosilica has been used to improve the performance of cement such as the acceleration of hydration of cement phases (b-C2S and C3S). Nevertheless, the utilization mode of this addition has always problems with the maneuverability of concrete. To this end, the aim of the study is to investigate the effect of the mode of introduction of Nanosilica on the fresh and hardened properties of ultra-high performance fiber fibers.

Key-words: Nanosilice, cement, superplasticizer, fiber reinforced concrete, UHPC, strength, compression, and stress-strain.

REMERCIEMENT

*Nous rendons grâce à dieu le tout puissant de nous avoir donnée le
Savoir et la volonté surtout la patience pour réaliser ce modeste
Travail*

*Nous exprimons nos sincères et profonds remerciements et
reconnaisances à*

Nos encadreur Dr. CHAËOUR K et

*Dr. SAFI BRAHIM, qui nous a aidé, conseillé et dirigé au
Cours de notre mémoire, ainsi que pour son apport moral et scientifique
Pendant l'accomplissement de ce travail.*

*Que tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à notre formation,
Trouvent ici notre gratitude et nos remerciements.*

*Nous tenons à exprimer nos profonde gratitude et remerciements à
Tous les enseignants de département de Génie des Matériaux de
L'Université de Boumerdes.*

*A fin Nous adressons nos remerciements aux responsables et
Techniciens du laboratoire de génie civile de
L'université de Tizi-Ouzou et ceux du l'ONGEOA et Yacine Rahmani,
Ingénieur, TECNACHEM, Yoba KHedim, GRANITEX et ZOHHÉIR
BENBRAHIM pour leurs aides à la bonne réalisation de la
Partie expérimentale de notre mémoire.*

DEDICACE

*Je dédié ce modeste travail à :
Mes chers parents, Mes frères
KARIM, SOFIANE, MUSTAPHA,
YOUCEF et*

*Mes sœurs : SOUAD et son marie, IMENE
Ainsi que mes nerveux et nièces.*

*A la famille CHAOU et surtout mon cousin
BRAHIM*

*A mes chères amies LES DEUX HAMZA,
OUSSAMA, CHERIF, MASSI, MOKHTAR
et toutes mes connaissances*

*Et une grande dédicace a mon binon
HADDADI Abderrahim*

*A tout le groupe MCQ MCD MSCM
Hamza*

2017

*Je dédie ce modeste travail à :
Mes chers et aimables parents,
A Mes frères :*

*SAMIR, MOUHEMMAD, SEDDIK, OMAR
et leurs femmes.*

Hommage a mon frère Brahim.

*Mes sœurs : SALIMA et AMINA et leurs
maries, mes neveux et nièces ainsi que mes
cousins et cousines, les deus Abdou, Wassim,
Rafiq, Otman, Rabah, Khaled,*

Et tous se qui porte le nom

HADDADI et DERHMANI

*A mes chères amies, ADNAN, SOHEIB,
HAMEZA, WANOÛ, les jumeaux KASER,
Koceïla, LOUNIS, SIDALI, AIMAN, ZAKI,
AMIN et toutes mes connaissances*

Et une grande dédicace à mon binon

CHAOÛ Hamza

Et a tout le groupe MCQ MCD MSCM

ABDERRAHIM

2017

Sommaire

Introduction générale	09
Les BETONS FIBRES ULTRA-HAUTE PERFORMANCES (BFUHP)	11
I.1. Introduction :	11
I.2. Définition	12
I.3 Constituants des BFUHP	12
I.3.1 Le Ciment	13
I.3.2 Le sable de dune	13
I.3.4 Les poudres fines	13
I.3.4.1 La fumée de silice :	13
I.3.5 Les fibres	14
I.3.5.1 Différent type de fibres :	14
I.3.5.2 Influence des fibres :	14
I.3.5.3 Définition des fibres polypropylène :	15
I.3.5.4 Avantages fibres de polypropylène :	15
I.3.5.5 Rôle des fibres polypropylènes dans bétons :	15
I.3.5.6 Applications	15
I.3.6 L'eau de gâchage :	16
I.3.7 Adjuvant :	16
I.3.7.1 Définition d'un super-plastifiant	16
I.3.7.2 Le Mode d'action	17
I.3.7.3 L'effet des super plastifiants sur les bétons	18
L'effet sur le béton à l'état frais	18
L'effet sur les bétons a l'état durci	19
I.4 Principe de formulation	19
I.4.1 Méthodes empiriques de formulation	19
I.4.2 Exemples de formulations	21
I.4.2.1 En laboratoire	21
I.4.2.2 En usine	22
I.4.2.3 Exemple de formulations réalisé :	22
I.5 Propriétés des BFUHP	23
I.5.1 Propriétés rhéologiques	23
I.5.2. Résistance en compression et module d'élasticité	23
I.5.3 Résistance en flexion	25

<u>I.5.4 Résistance à la traction</u>	25
<u>I.5.3 Effets différés du BFUHP</u>	26
<u>I.5.3.1 Retrait</u>	26
<u>I.5.3.2 Fluage</u>	26
<u>I.5.4 Traitements thermiques</u>	26
<u>Le but d'utiliser le traitement thermique :</u>	27
<u>I.5.5 Microstructure et durabilité des BFUHP</u>	27
<u>Particularité des BFUHP selon la microstructure</u>	28
<u>I.5.6 Absorption d'eau</u>	29
<u>I.5.7 Carbonatation</u>	29
<u>I.5.8 Auto-cicatrisation des fissures</u>	29
<u>I.5.9 Influence du rapport E/C</u>	30
<u>I.5.10 Influence de la teneur en fibres :</u>	30
<u>I.5.11 Mise en œuvre</u>	31
<u>I.5.12 Domaine d'utilisation :</u>	32
<u>I.6. Les avantages de BFUHP</u>	32
<u>I.7. Inconvénient</u>	32
<u>La nano-silice</u>	33
<u>II.1 Introduction</u>	33
<u>II.2 Définition</u>	33
<u>II.3 Méthode de production de nano-silice :</u>	34
<u>II.4 Effet de l'addition NS dans le béton et les mortiers</u>	35
<u>II.5 Mécanisme et mode d'action de la NS</u>	36
<u>Effet filler :</u>	36
<u>Effet pouzzolanique</u>	37
<u>II.6 Domaine d'applications de la nano-silice</u>	37
<u>METHODOLOGIE et CARACTERISATION des MATERIAU</u>	38
<u>III. 1. Méthodologie du travail</u>	38
<u>III.2. Caractérisation des matériaux utilisés :</u>	39
<u>III.2.1 Caractérisation des ciments</u>	39
<u>III.2.1.1 Caractéristiques chimique et minéralogiques</u>	39
<u>III.2.1.1.1 La composition chimique :</u>	39
<u>III.2.1.1.2 La composition minéralogique</u>	40
<u>III.2.1.2 Caractéristiques physique</u>	40
<u>III.2.1.2.1 Surface spécifique de BLAINE (SSB) NF EN 196-6</u>	40

III.2.1.2.2 Consistance normale NF EN196-03	40
III.2.1.2.3 Début et fin de prise : NF EN196-03	41
III 2.1.3 Caractéristiques mécaniques	41
III.2.1.3.1 La résistance à la compression et à la flexion	41
III.2.2 Sable de dune	42
III.2.2.1 Les caractéristiques du sable	42
III.2.2.1.1Caractéristiques physiques	42
III.2.2.1.2 Analyse granulométrique	42
III.2.2.1.3 Essais de bleu de méthylène	43
III.2.3 Les poudres fines	43
III.2.3.1 La fumée de silice (FS)	43
III.2.3.1.1 Caractéristiques chimiques de la fumée de silice	44
III.2.3.1.2 Caractéristiques physique	44
III.2.3.1.3 Caractères généraux	44
III.2.3.1.4 Domaines d'application	44
III.2.3.2 La nano-silice	45
III.2.3.2.1 Propriétés physico-chimique :	45
III.2.3.2.2 Applications et propriétés	45
III.2.3.2.2.1 Applications	45
III.2.3.2.2.2 Propriétés	46
III.2.4 Eau de gâchage	46
III.2.5Les adjuvants	46
III.2.5.1Propriétés chimiques et physique	46
III.2.5.2 Caractéristiques	46
III.2.5.3 Domaines d'application	46
III.2.5.4 Dosage	47
III.2.5.5 Mode d'emploi	47
III.2.6 Les fibres	47
III.2.6.1 Domaine d'application	47
III.2.6.2 Propriétés	47
III.2.6.3 Caractéristique	48
III.2.6.4 Mode d'emploi	48
III.2.6.5 Consommation	48
III.2.6.6 La mise en place du béton	48
FORMULATION des BETONS et METHODES d'ESSAIS	49

<u>IV.1 Formulation des BFUHP :</u>	<u>49</u>
<u>IV.2 Protocoles des mélanges des bétons</u>	<u>50</u>
<u>IV.2.1 Pour le béton témoin et le mode II</u>	<u>50</u>
<u>IV.2.2 Pour le mode I</u>	<u>51</u>
<u>IV.3 Confection des éprouvettes</u>	<u>52</u>
<u>IV.4 Propriétés déterminées des BFUHP</u>	<u>52</u>
<u>IV.4.1 Propriétés à l'état frais :</u>	<u>52</u>
<u>IV.4.2 Propriétés à l'état durci :</u>	<u>52</u>
<u>RESULTATS et DISCUSSIONS</u>	<u>53</u>
<u>V.1 Propriétés de BFUHP à l'état frais :</u>	<u>53</u>
<u>V.1.1 Fluidité des bétons :</u>	<u>53</u>
<u>V.2 Propriétés des bétons à l'état durci</u>	<u>54</u>
<u>V.2.1 Masse volumique apparente des BFUHP</u>	<u>54</u>
<u>V.2.2 L'essai à l'ultrason</u>	<u>56</u>
<u>V.2.3 Résistance mécanique des bétons :</u>	<u>57</u>
<u>V.2.3.1 Résistance mécanique de Bétons témoin</u>	<u>57</u>
<u>V.2.3.2 Résistance mécanique pour le premier mode :</u>	<u>59</u>
<u>V.2.3.2 Résistance mécanique pour le deuxième mode :</u>	<u>61</u>
<u>V.2.3.3 Comparaison des résultats :</u>	<u>63</u>
<u>V.2.3.3.1 Compression et flexion à 2 jours :</u>	<u>63</u>
<u>V.2.3.3.2 Compression et flexion à 28 jours :</u>	<u>64</u>
<u>CONCLUSION GENERALE</u>	<u>66</u>
Référence bibliographie	
La liste des tableaux	
La liste des figures	

INTRODUCTION GENERALE

En construction Le béton est le matériau le plus répandue au monde c'est un produit Composite à matrice minérale généralement en ciment, possédant certaines particularités. En effet, sa rapidité de fabrication, sa mise en place, son faible coût de revient (pour les bétons ordinaire), ses performances mécaniques et sa durabilité favorise son utilisation dans divers domaine. Il peut supporter des charges supérieures et permet des constructions plus élancées. Il peut également présenter des formes plus complexes et à réalisation de plus grandes portées.

Le béton renforcé de fibres (métalliques, organique, synthétique..) est un matériau composite à matrice fragile. Il est constitué d'un renfort (fibre) plongé dans une matrice (pâte de ciment).

Les bétons fibré en connue un développement depuis le jour de sa sortie au monde d'un béton fibré a un béton fibré a haute performance (BFHP) jusqu'à nous jours, ou on est arrivait a un béton fibré a ultra haute performance (BFUHP). Ce dernier type de béton, caractérisé par ses résistances mécaniques élevés, une compacité remarquable qui conduit a une bonne durabilité.

Jusqu'à nous jours on chercher à développer les BFUHP pour avoir des résultats meilleurs (compacité, résistance mécanique, et durabilité). Et c'est le bute de notre travail.

Dans notre présent travail nous étudierons l'influence de l'introduction de nano-silice dans un béton fibré cas de fibres polypropylène incorporées dans une matrice cimentaire. Ce concept d'utilisation de béton renforcé avec des fibres métalliques est concrétisé vers le début des la fin des années soixante. L'idée majeure proposée par les chercheurs était de réduire la fissuration et d'augmenter la résistance globale à la traction. Ce nouveau matériau présente en effet des propriétés intéressantes, comme la bonne résistance à la traction, à la fatigue aux chocs et l'amélioration de la durabilité face aux cycles de gel dégel. On peut en effet attendre de ce matériau une répartition de la

Introduction Générale

fissuration plus homogène du fait de sa constitution. Un pourcentage plus ou moins grand de fibres, de dimensions et de formes variables, dans notre travail les pourcentages, formes et dimensions sont invariables.

Le but de notre travail est d'introduire la nano-silice dans un BFUB pour savoir son influence sur les propriétés du béton. Ce produit industriel (nano-silice) a base de silicium qu'on commencé à l'utilisé au cours de ses dernières année. Pour réalisé ce travail on c'est basé a deux mode d'introduction de la poudre NS qui sera expliqué en détaille dans les pages qui suit.

Les BETONS FIBRES ULTRA-HAUTE PERFORMANCES (BFUHP)

Au cours de ses dernières années, les bétons ont été développés pour but d'avoir des performances meilleures que celle des bétons ordinaires que sa soient sure le coté résistance mis en œuvre et durabilité sans négligé le point de veut économique et écologique. Le présent travaille vient a apporté des connaissances sur un de ses bétons développés connues sur le nom BFULHP (béton fibré a ultra-haute performance). Les performances de ses bétons ainsi que leurs méthodes de formulations ses avantages et inconvénients seront aussi présentés.

I.1. Introduction :

Comme les bétons classiques, le Béton Fibré à Ultra-hautes Performances (BFUHP) est un matériau qui se base sur le ciment comme liant principale. Tout comme les bétons ordinaires, il est basé sur une matrice cimentaire composée d'agrégats minéraux, de ciment, d'adjuvants et d'eau en plus, il contient une assez grande proportion de fibres généralement métalliques (dans le cas de notre étude des fibres synthétique polypropylène). Par contraste avec les formulations de bétons à hautes résistances (Concrete70 à Concrete120), chacune de ses composantes est optimisée pour garantir une compacité maximale, une résistance optimale et des propriétés mécaniques exceptionnelles.

Les résultats sont impressionnants, puisque les BFULHP atteignent des résistances à la compression de l'ordre de 180 MPa (6 fois celle du BO) et des résistances à la traction de l'ordre de 10 MPa (4 fois celle du BO). Le module d'élasticité des BFULHP est typiquement plus élevé (50 à 65 GPa) que celui du BO, grâce à la haute qualité de la pâte de ciment et du granulat utilisé. La contrainte d'adhérence du BFULHP est également excellente, de l'ordre de 5 à 10 fois celle du BO. La densité du matériau est légèrement plus élevée que celle du béton ordinaire, à environ 2.7 t/m³.

Grace à sa granulométrie hautement optimisée, également pour ses composantes fines et ultrafines, le BFUHP a une matrice très dense, avec une porosité basse et une surface lisse (sauf dans les zones où des fibres sortent de la matrice). Le BFUHP présente ainsi des propriétés exceptionnelles en matière de durabilité, permettant la construction d'éléments minces avec des enrobages très faibles. Sa résistance à l'abrasion est également très bonne, ce qui lui favorise d'être utilisé dans des surfaces exposées à de grandes forces de contact (surfaces de roulement ou hydrauliques). Même en cas de fissuration, la présence d'une grande quantité de fibres (2 à 6% en volume, 160 à 480 kg/m³, pour les fibres utilisées de se travaille ≥ 600 g/m³) assure qu'une fissure qui s'initie dans le BFUHP est immédiatement contrôlée et que son ouverture reste petite, à la limite du visible. Pour certains types d'éléments de structure, il est possible de se passer entièrement de toute armature, ordinaire ou de précontrainte, grâce à la résistance à la traction offerte par les fibres, ce qui conduit à des éléments minces et légers.

La procédure de fabrication d'un BFUHP ainsi que les déferents constituants, caractéristiques et propriétés de ce dernier serrant présentés d'une façon détaillé dans les chapitres suivants.

I.2.Définition

Les BFUHP sont des matériaux nouveaux sortie des laboratoires au 21^{em} siècle qui peuvent être considères comme une extension du béton ordinaire (BO) et du béton à hautes performance(BHP), Ils sont caractérisés par une excellente résistance à la compression supérieure à 150 MPa. Ces matériaux sont additionnés de fibres métalliques (BFUP), des fibres polypropylènes dans notre travaille, en vue d'obtenir un comportement ductile en traction. Ils se caractérisent aussi par leur fort dosage en liant ainsi qu'une durabilité exceptionnelle. Les plus gros agrégats sont les grains de sable (moins de 3 mm de diamètre) et de courtes fibres (0.2 mm de diamètre x 12 mm de longueur) fournissent une résistance en flexion. La résistance extrême en compression et la capacité de se déformer avec la formation de micro fissures sont deux caractéristiques importantes d'un BFUHP

I.3 Constituants des BFUHP

Les différents constituants (composants granulaires et adjuvants) qui rentrent dans la composition des BFUHP sont :

- Ciment
- Sable de dune
- Les poudres fines (fumée de silice, nano silice)
- les fibres polypropylène
- l'eau de gâchage
- Le super plastifiant haut réducteur d'eau

I.3.1 Le Ciment

Les formulations de Béton Fibrés Ultra Performants (BFUP) se caractérisent par l'emploi d'une grande quantité de ciment allant de 700 kg/m³ jusqu'à plus de 1000 kg/m³ d'après la plupart des auteurs. Cette quantité considérable de ciment, à laquelle vient s'ajouter aussi des ultrafines, a pour but de diminuer au maximum les vides, et d'augmenter, par conséquent, la compacité du mélange. Durant le processus d'hydratation, seulement 30% de cette grande quantité de ciment est hydraté. Les grains de ciment anhydre, de grande surface spécifique et de résistance supérieure à celle des hydrates du ciment (portlandite et C-S-H), jouent donc aussi un rôle de fine en procurant, en complément, au matériau une capacité d'auto-cicatrisation.[1]

Pour ce qui est du type de ciment, le choix se porte généralement sur le CEMI 52,5 PMES .Ce type de ciment permet d'obtenir des performances mécaniques élevées de par sa classe 52,5. Contenant une faible teneur en C3A, il permet aussi de réduire la demande en eau, et donc d'augmenter l'ouvrabilité du BFUP. Malgré les avantages que le CEM I 52,5 PM-ES peut apporter, d'autres types de ciment tels que le CEM II 42,5 et les CEM III ont été utilisés dans la confection de BFUP. [2]

1.3.2 Le sable de dune

C'est un produit de la désagrégation lente des roches sous l'action des agents d'érosion tels que l'air, la pluie etc. Les déserts de sable, ou ergs, se localisent dans les vastes cuvettes d'épandage ou des puissantes accumulations alluviales se sont concentrées par de grands écoulements liés aux périodes pluviales du début du quaternaire. Les grands ergs coïncident avec des zones où des vents saisonniers de directions variées se compensent. Ce type de sable est quartzueux et de granulométrie fine ce qui favorise son utilisation dans les BFHUP.

I.3.4 Les poudres fines

Généralement les poudres fines sont utilisées comme ajouts aux ciments et/ou dans les bétons pour avoir une bonne qualité de produit (ciment ou béton), on tenant compte le coté économique, écologique et technique. Une variété de poudre existe à nous jours, le laitier des hauts fourneaux, les cendres volantes, le pouzzolane, la fumée de silice...etc. Pour notre travail les poudres utilisées sont la fumée de silice qui sera présentée à la suite, alors que la nano silice sera présentée dans le chapitre II.

1.3.4.1 La fumée de silice :

La fumée de silice est un sous-produit de l'industrie du silicium et des alliages de Ferro-silicium. Ces produits sont fabriqués dans un four à arc, en réduisant le quartz par un apport approprié de carbone, à une température d'environ 2 000 °C. La fumée de silice est extraite en surface du four de réduction par des ventilateurs principaux et résulte de la condensation du gaz SiO, intermédiaire réactionnel du procédé de carbo-réduction. Elle est ensuite récupérée et filtrée dans un filtre à manches, avant d'être densifiée pour en faciliter la manipulation.

La fumée de silice est initialement produite sous forme de poudre grise, non-densifiée et principalement composée de particules ultrafines. Ces particules contiennent au moins 85 à 98% de silice SiO₂ amorphe et se présentent sous la forme de microsphères vitreuses dont le

diamètre moyen se situe entre 0,1 et 0,2 μm , Leur surface spécifique varie entre 13 000 et 30 000 m^2/kg , et leur densité se situe entre 2,00 et 2,25

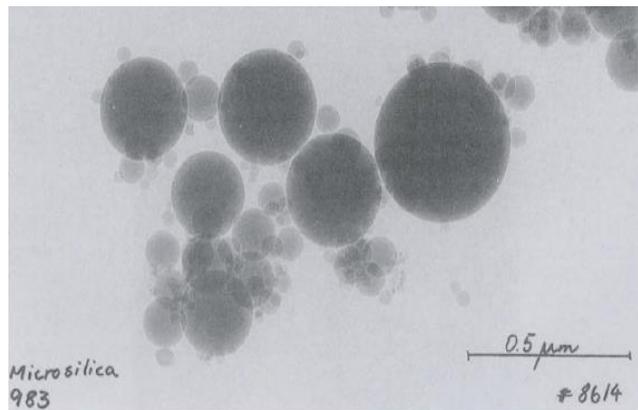


Figure I.1 : Particules individuelles de FS vues au MEB

Grâce à sa très grande finesse, sa forte teneur en silice et sa structure essentiellement vitreuse, la fumée de silice constitue un produit hautement pouzzolanique, fréquemment utilisé pour la fabrication des bétons à ultra hautes performances.

1.3.5 Les fibres

Les fibres sont ajoutées aux bétons pour augmenter la résistance à la traction et apporter un caractère ductile aux bétons fragiles par nature. En général, les fibres métalliques, synthétiques, de verre ou végétales peuvent être incorporées dans le béton. En ce qui concerne les BFUP, elles peuvent être de nature métallique ou organique. Le choix se fait en fonction du type d'application visée. En effet, la prénorme matériaux BFUP (PR NF P18-470) préconise l'utilisation des fibres métalliques pour les BFUP structuraux, et les fibres synthétiques dans le cas de BFUP non structuraux, nous traitons ici uniquement le cas des fibres polypropylène.

1.3.5.1 Différent type de fibres :

- Les fibres métalliques : acier, inox...
- Les fibres organiques : polypropylène, kevlar, carbone....
- Les fibres minérales : verre, mica....

Les dosages courants en fibres varient avec le type utilisé.

1.3.5.2 Influence des fibres :

Chaque type de fibre possède des caractéristiques particulières qui les rendent apte à servir à une utilisation plutôt qu'à une autre.

Ainsi l'adoption d'une fibre influencera les facteurs suivants:

- Densité
- Résistance tension et en compression,
- Résistance aux impacts et à la fatigue

- Module d'élasticité,
- Conductivités thermique et électrique
- Stabilité dimensionnelle
- Résistance aux conditions environnementales,
- Coût

Dans notre travail, on a utilisé les fibres polypropylène du fabricant GRANITEX.

1.3.5.3 Définition des fibres polypropylène :

Les fibres de polypropylène sont des fibres chimiques de nouvelle génération. Ils sont fabriqués à grande échelle et ont le quatrième plus grand volume de production après les polyester, les polyamides et les acryliques. Environ 4 millions de tonnes de fibres de polypropylène sont produites dans le monde en une année.

Les fibres de polypropylène ont d'abord été suggérées pour être utilisées en 1965 comme mélange dans le béton pour la construction de bâtiments résistant aux explosions destinés au Corps des ingénieurs des États-Unis.

1.3.5.4 Avantages fibres de polypropylène :

Les fibres de polypropylène sont non magnétiques, sans rouille, résistantes aux alcalis, sûres et faciles à utiliser. La ficelle en polypropylène est peu coûteuse, abondamment disponible et de qualité constante. Les fibres de polypropylène sont également compatibles avec tous les adjuvants chimiques en béton et peuvent être manipulées facilement. Le poids moléculaire élevé du polypropylène, lui confère de nombreuses propriétés utiles. Les fibres de polypropylène sont chimiquement inertes et, par conséquent, tout produit chimique qui n'attaquera pas les constituants du béton n'aura aucun effet sur la fibre. Lorsque des produits chimiques plus agressifs entrent en contact, le béton se détériorera tout d'abord avant les fibres.

1.3.5.5 Rôle des fibres polypropylènes dans bétons :

Le béton développe des fissures micro avec un durcissement et ces fissures se propagent rapidement sous contrainte appliquée, ce qui entraîne une faible résistance à la traction du béton. Par conséquent, l'ajout de fibres améliore la résistance du béton et ces problèmes peuvent être surmontés par l'utilisation de fibres de polypropylène dans le béton. L'application de fibres de polypropylène fournit une résistance au béton tandis que la matrice protège les fibres. Le rôle principal des fibres dans un composite cimentaire est de contrôler les fissures, d'augmenter la résistance à la traction, la ténacité et d'améliorer les caractéristiques de déformation du composite. La performance de FRC dépend du type de fibres utilisées. L'inclusion de fibres de polypropylène réduit la perméabilité à l'eau, augmente la résistance à la flexion grâce à son haut module d'élasticité. Dans le stade de craquage post, lorsque les fibres sont retirées, l'énergie est absorbée et la fissuration est réduite.

1.3.5.6 Applications

Les fibres de polypropylène sont polyvalentes et largement utilisées dans de nombreuses applications industrielles telles que les cordes, les produits d'ameublement, les matériaux d'emballage, etc. Ils sont également utilisés dans l'étiquetage, les tapis, le textile, les marchés

de vêtements, la papeterie, les pièces en plastique, les récipients réutilisables, les équipements de laboratoire, l'automobile Composants, haut-parleurs, etc. Béton renforcé de fibres de polypropylène utilisé dans les routes et les trottoirs, les voies d'entraînement, les superpositions et les garnitures, les plaques supportées au sol, les fondations de machines, les structures hors terre, les réservoirs et les piscines, etc.

1.3.6 L'eau de gâchage :

La qualité de l'eau de gâchage peut avoir une influence sur le temps de prise, le développement des résistances du béton et la protection des armatures contre la corrosion.

Lors de l'évaluation de l'aptitude à l'emploi d'une eau de qualité non connue pour la production d'un béton, il convient de considérer autant la composition de l'eau que l'application au béton à produire

En fin, toute eau naturelle potable n'ayant pas une odeur ou un goût prononcé peut être employée pour la fabrication du béton, alors l'eau doit satisfaire aux prescriptions suivantes :

1.3.7 Adjuvant :

On appelle adjuvant, tout ingrédient autre que le ciment, les granulats et l'eau, que l'on ajoute au mélange. Ce sont le plus souvent des polymères de synthèse au poids moléculaire assez élevé (20000. 30000). Les adjuvants de béton sont des produits chimiques solubles dans l'eau qui modifient principalement:

- les solubilités
- les vitesses de dissolution
- l'hydratation des divers constituants d'un liant hydraulique

Ce sont des produits superficiels, minéraux ou organiques à l'état de poudre ou liquide dont l'incorporation à faibles doses (inférieures à 5% de la masse de ciment) aux bétons, mortiers ou coulis lors de malaxage ou avant la mise en œuvre, (D'après la norme **NF EN 934-2**), afin de modifier les propriétés du béton (mortier) pour but d'obtenir les caractéristique souhaité que sa soit a l'état frais ou durcis.

Compte tenu des très faibles rapports Eau/Liant des BFUP, la quantité d'eau est insuffisante pour obtenir une maniabilité correcte permettant une bonne mise en œuvre de ces bétons. L'emploi d'adjuvants de la famille des super-plastifiants, généralement hauts réducteurs d'eau, est donc indispensable pour fluidifier le mélange, mais aussi pour disperser les grains. Ce sont généralement des super-plastifiants de troisième génération de type phosphorâtes et/ou poly-carboxylate modifié. Ils permettent de réduire la teneur en eau, et en améliorant la maniabilité des BFUP. Le dosage en adjuvant est élevé, autour de 5% de la masse de ciment, et peut varier selon les types de super-plastifiant et de ciment utilisés. Ce dosage est supérieur à celui des bétons ordinaires, qui est de 0,5 à 1% de la masse de ciment.

1.3.7.1 Définition d'un super-plastifiant

Selon la norme NA774, un super-plastifiant est un adjuvant qui, introduit dans un béton, un mortier ou coulis, a pour fonction principale de provoquer un accroissement important de l'ouvrabilité du mélange. Spécialement pour l'industrie du béton. Ils sont à base de sels de sodium ou de calcium de poly-naphtalène sulfoné, de sel de sodium de poly-mélatamine sulfoné, de copolymère acrylate-ester (polyacrylate), ou de ligno-sulfonât de grande pureté;

les plus utilisés sont les deux premiers qui sont communément appelés super-plastifiants à base de naphthalène et super-plastifiants à base de mélamine. Les super-plastifiants sont des polymères organiques solubles dans l'eau dont la synthétisation réalisée par une opération complexe

1.3.7.2 Le Mode d'action

Un super-plastifiant permet de réduire la quantité d'eau et donc d'augmenter la résistance mécanique du béton tout en contrôlant sa rhéologie. Il devient possible de rapprocher considérablement les grains de ciment lorsqu'ils s'hydratent durant le mélange. Cet effet, permet ainsi de confectionner des bétons à matrice cimentaire très dense et très imperméable qui présentent une résistance à la pénétration des agents agressifs sans commune mesure avec celle des bétons ordinaires.

La grande majorité des super-plastifiants actuellement utilisés dans l'industrie du béton sont des poly-naphthalènes sulfonates (PNS) ou des poly-mélatamines sulfonates (PMS) dont le mode d'action est essentiellement la répulsion électrostatique. Plus récemment, deux nouvelles familles de produits ont été mises au point : les polyacrylates (PA) et les poly-carboxylates (PC).

Ces super-plastifiants hauts réducteurs d'eau à effet fluidifiant prolongé sont des polymères acryliques (chargés négativement) sur lesquels sont fixés des polymères non chargés (Poly oxydes d'éthylène) ou présentant des groupements terminaux anioniques. Spécialement Conçu pour le béton de bâtiment et de génie civil, ils permettent la confection de bétons à hautes performances. Leur action dispersante, liée aux groupements polyoxydes d'éthylène très encombrants, est principalement due à des forces de répulsion stériques.

Ces adjuvants présentent deux effets qui peuvent être à l'origine de la dispersion :

- la défloculation par répulsion électrostatique suite à l'adsorption de molécules portant de nombreuses charges de même signe (Figure I.2) ;
- la lubrification des grains par répulsion stérique due à l'encombrement des molécules (Figure I.3).

Les polyacrylates sont les plus efficaces. Ils permettent une grande diminution de l'eau de gâchage pour une fluidité donnée, ce qui entraîne l'augmentation importante de la résistance. En outre, ils assurent un meilleur maintien de la fluidité dans le temps. L'action prolongée de ces nouveaux adjuvants peut s'expliquer de la manière suivante :

- les adjuvants traditionnels s'absorbant essentiellement à plat, les hydrates qui se forment à la surface des particules les recouvrent très rapidement et les rendent, dès lors, inefficaces. Le phénomène est accentué lorsque l'adjuvant est introduit dans l'eau de gâchage ;
- les nouveaux super-plastifiants s'adsorbent aussi par l'intermédiaire de leurs charges anioniques mais leurs groupements poly-oxydes d'éthylène (neutres électriquement et hydrophiles) se prolongent loin dans l'eau : il faut donc plus de temps pour les recouvrir

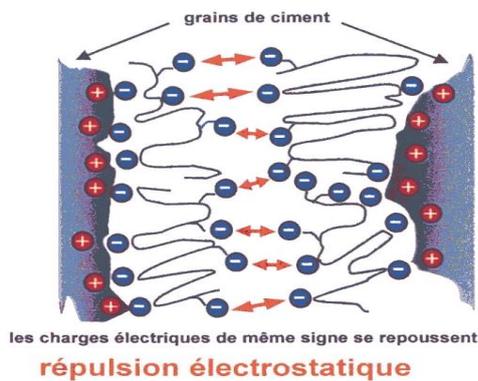


Figure I.2 : Dispersion par répulsion électrostatique

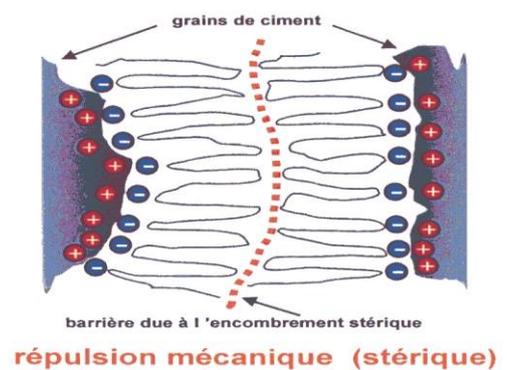


Figure I.3 : Dispersion par répulsion Stérique

La combinaison des poly-carboxylates avec les poly-naphtalènes sulfonâtes semble améliorer l'efficacité en contrôlant la perte de fluidité dans le temps .L'efficacité des super-plastifiants est améliorée par un bon malaxage lors de la fabrication. L'augmentation de l'énergie de malaxage permet l'amélioration de la dispersion et l'efficacité Du super-plastifiant et d'assurer une meilleure homogénéité du matériau [3]

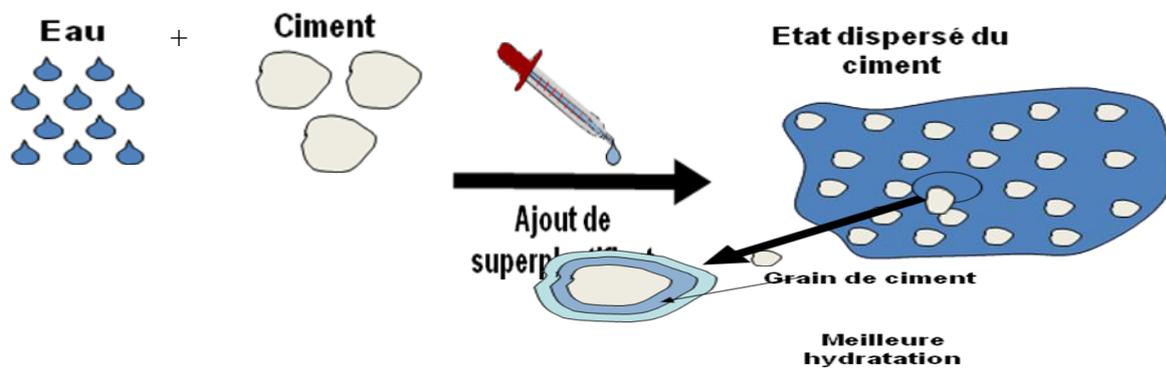


Figure I.4 : le mode d'action de super-plastifiant

1.3.7.3 L'effet des super plastifiants sur les bétons

L'effet sur le béton à l'état frais

- Diminution de la teneur en eau.
- Amélioration de l'ouvrabilité.
- Maintien de l'ouvrabilité dans le temps (jusqu'à 2h30 – 3h00 à 20°C).
- Diminution du ressuage.
- Diminution de la ségrégation.
- Amélioration de la pompabilité des bétons.
- Réduction du retrait hydraulique.

L'effet sur les bétons a l'état durci

- Amélioration des résistances mécaniques à court et long terme.
- Diminution du retrait (due à la réduction du rapport E/C et à l'augmentation du rapport Granulat/Ciment).
- Amélioration de la compacité.
- Amélioration de la liaison béton / acier.
- Réduction de la porosité capillaire de la pâte de ciment.
- Diminution du coefficient de la perméabilité.

I.4 Principe de formulation

A l'heure actuelle, il n'existe pas de méthode générale de formulation des BFUP, mais plutôt des principes. Ces principes proposés par et se basent sur différents critères [4] :

- Réduction du rapport Eau/Liant (E/L) ;
- Amélioration de l'homogénéité du mélange en réduisant la taille des grains inertes (granulats).
- Augmentation de la teneur en fines (ciment et additions) ;
- Amélioration et optimisation de la compacité du squelette granulaire ;
- Ajout de fibres afin d'améliorer la ductilité du béton ($\geq 2\%$ volumique) ;
- Amélioration éventuelle de la microstructure par traitement thermique.

La démarche adoptée vise à réduire la porosité du matériau et à augmenter la compacité du squelette granulaire. Pour cela, le rapport E/L est réduit à des valeurs inférieures à 0,2 grâce à l'utilisation optimisée de super-plastifiants qui déflocculent les particules fines. L'optimisation du squelette granulaire s'effectue à deux niveaux. Le premier niveau consiste à réduire la taille des granulats pour obtenir un mélange plus homogène et limiter la porosité inter-granulaire. Le deuxième consiste à améliorer la compacité du mélange en augmentant la teneur en liant, qui comble les vides entre les grains. L'application d'un traitement thermique est possible pour accroître davantage les performances mécaniques. Enfin, l'ajout de fibres permet d'améliorer la ductilité du béton. [4]

I.4.1 Méthodes empiriques de formulation

L'expérimentation peut permettre de formuler un béton sans expliquer ou formaliser les phénomènes qui entrent en jeu dans la formulation des bétons. Les travaux menés ont abouti au début des années 90 à une nouvelle génération de bétons, dit Bétons à Ultra Hautes Performances, dépassant les 150 MPa en compression. Les principes généraux de formulation peuvent être présentés comme suit :

- amélioration de l'homogénéité macroscopique du béton par réduction du diamètre du plus gros granulat.
- amélioration de la compacité par optimisation du squelette granulaire.
- réduction du rapport eau/liant.

- amélioration de la microstructure par traitement thermique après la prise.
- choix de constituants de très grandes qualités (dureté du sable, indice d'activité de la fumée de silice, classe vraie du ciment, pouvoir défloculent du super-plastifiant).

Une compacité élevée du squelette granulaire est obtenue en augmentant l'étendue granulaire du squelette par adjonction des poudres fines dont la dimension des particules est inférieure à celles des ciments. [4]

Selon le volume et la nature des fibres utilisées (acier ou carbone...etc.), la masse volumique des BFUHP varie entre 2300 et 3000 kg/m³, la teneur en air est inférieure à 4% (généralement 2%). Avec un pressage, la teneur en air peut atteindre un chiffre inférieur à 1%. Une formule type de BFUHP est présentée sur le Tableau. Avec ou sans quartz broyé et renforcé de fibres d'acier [1]

Matériau	Sans quartz broyé		Avec quartz broyé	
	Proportions de la masse du ciment	kg/m ³	Proportions de la masse du ciment	kg/m ³
Ciment	1	934	1	740
Fumée de silice	0,25	234	0,32	240
Quartz broyé	–	–	0,30	220
Sable	1,10	1030	1,40	1050
Eau	0,23	215	0,20	150
Super-plastifiant (% E.S)	1,40	13	1,80	13
Fibres d'acier (% en volume de béton)	2,4	187	2	150

Tableau I.1 : Formules types de BFUHP [1]

L'optimisation du dosage en super-plastifiant des BFUHP dépend généralement de la maniabilité souhaitée et de la facilité de mise en place dans les moules (coulabilité). Le dosage en super plastifiant est compris entre 1,8 et 3% en extrait sec par rapport au ciment. Dans notre travail on a opté pour une formulation empirique qui convient aux matières premières disponible. Le tableau suivent définir une formulation qui proposé, et qui a été la base de début de formulation de notre travail.[5]

Exemples de formulations de BFUHP (pour 1 m ³)						
Ciment	Sable Fin	Quartz broyé	Fumée de silice	Fibres métalliques	adjuvent (extrait sec)	Eau totale
710 kg	1020 kg	215 kg	230 kg	160 kg	10 kg	140 l
1 075 kg	1030 kg	—	160 kg	220 kg	35 kg	200 l

Tableau I.2 : Exemples de formulations de BFUHP (pour 1 m³) proposé par un auteur.

I.4.2 Exemples de formulations

Quelques exemples de formulations de BFUHP sont présentés dans cette partie afin de mettre en évidence, notamment, les différences pouvant exister lors de l'élaboration de ces bétons en laboratoire et en usine de préfabrication.

I.4.2.1 En laboratoire

Une étude assez complète sur les BUHP a été réalisée au CERIB. Les matières premières utilisées pour réaliser les différentes formules de BUHP étaient :

- deux ciments : CPA CEM 1 52,5 PM ES CP2 et CPA CEM 1 52,5 R.
- une fumée de silice (diamètre des sphères élémentaires compris entre 0,1 et 0,5 μm).
- du quartz broyé (diamètre moyen de 9 μm).
- un sable siliceux (80% des grains compris entre 200 et 500 μm).
- des fibres métalliques (longueur de 1 à 13 mm, diamètre de 50 à 160 μm).
- plusieurs ultrafines : fumées de silice, méta kaolins, silicates d'alumine, cendres Volantes.
- différents adjuvants : poly naphtalènes, poly mélamines, polyacrylates, éther Poly carboxylique (le choix était basé sur des critères d'efficacité et de coût). [6]

La plupart des gâchées ont été réalisées avec un malaxeur à mortier de 5 litres. Il est indiqué que l'introduction de super-plastifiant en deux temps augmentait son efficacité et permettait ainsi de réduire la quantité à utiliser pour une fluidité donnée. Le premier ajout d'eau et de super-plastifiant permet de mouiller la surface des constituants secs (Tableau).

Formule utilisée (proportions massiques)	Séquence de malaxage
Ciment : 1 F.S : 0,2 Sable : 0,7 E/C : 0,2	Mélange des matériaux secs : 2 min Ajout de l'eau et 50% du super-plastifiant : 3 à 6 min Reste du super-plastifiant : 2 à 8 min Ajouté les fibres éventuellement

Tableau I.3 : Formulation et séquence de malaxage [6]

Avec CPA-CEM I 52,5 PM ES CP2	% Poids ciment	% Extrait sec	Ecoulement
Eucoflow 346	3,05 %	1,10 %	170 secs
(d = 1,12 ; E.S. = 36 %)	5,00 %	1,80 %	100 secs
Avec CPA-CEM I 52,5 R	% Poids ciment	% Extrait sec	Ecoulement
Optima 100	1,50 %	0,45 %	Pas d'écoulement
Eucoflow 346	2,08 %	0,75 %	

Tableau I.4 : Maniabilités obtenues pour une formule de BFUHP utilisant différents types et Dosages de super-plastifiant [6]

Le Tableau, présente quelques résultats de la maniabilité d'une formule de BUHP, selon les ciments et adjuvants utilisés. Il apparaît que ces deux paramètres sont essentiels vis-à-vis de l'écoulement et donc de la mise en œuvre.[6]

1.4.2.2 En usine

BONNEAU a fabriqué le BUHP-1A (sans fibre) et BUHP-1B (avec fibres) dans une bétonnière. Le mélange BUHP-2 avec fibres a été fabriqué dans une usine de préfabrication. Les essais ont été réalisés sur des cylindres 100 mm de diamètre et de 200mm de hauteur.[1] Les résultats sont présentés dans le Tableau.

Caractéristiques	BUHP-1A	BUHP-1B	BUHP-2
Type de cure	Dans l'eau à 90°C, 3 jours	Dans l'eau à 90°C, 3 jours	Chambre humide, T°C < 90°C, 3j et séchage.
Echéance (jours)	16	16	14
Résistance à la compression (MPa)	163	217	197
Module d'élasticité E (GPa)	46	49	49
Coefficient de Poisson ν	0,19	0,19	0,19

Tableau I.5: Caractéristiques mécaniques en compression uni-axiale de trois BUHP[1]

Les résistances à la compression sont supérieures à 150 MPa pour les trois matériaux ce qui justifie leur appellation de BFUHP. D'autre part, on constate que les valeurs obtenues en usine de préfabrication sont légèrement inférieures à celles obtenues en laboratoire, mais faut signaler que les conditions de traitement (cure) n'étaient pas identiques.

1.4.2.3 Exemple de formulations réalisé :

Les formulations types des BFUP sont généralement établies empiriquement, en s'appuyant sur quelques principes que nous venons d'exposer. Le premier chantier en BFUP fut la réalisation d'une passerelle piétonne à Sherbrooke (Canada) en 1997. La composition de ces bétons est détaillée dans le Tableau :

	Ciment	Fumée de silice	Quartz broyé	Fibres métalliques	Sable	Adjuvat Kg	E /C	F_{cm28} (MPa)
Sans fibres (Kg/m³)	750	230	210	-	1010	45	0,28	163
Fibré (Kg/m³)	695	225	210	200	990	45	0,28	217

Tableau I.6:BUHP et BFUP utilisés pour la construction d'une passerelle à Sherbrooke au Canada [7]

I.5 Propriétés des BFUHP

I.5.1 Propriétés rhéologiques

On s'intéressera à l'étude de l'écoulement du béton alors qu'il est encore à l'état frais et maniable. Il est généralement admis que le comportement du béton frais est bien représenté par le modèle Binghamien après qu'un cisaillement ait été imposé pendant un certain temps. Le béton peut donc être caractérisé entièrement par deux paramètres soit la viscosité plastique et le seuil de cisaillement selon Bonneau [1](Figure I.5).

En pratique, on utilise un rhéomètre, appareil qui sert à étudier les propriétés rhéologiques des substances, pour évaluer le comportement rhéologique des BFUHP.

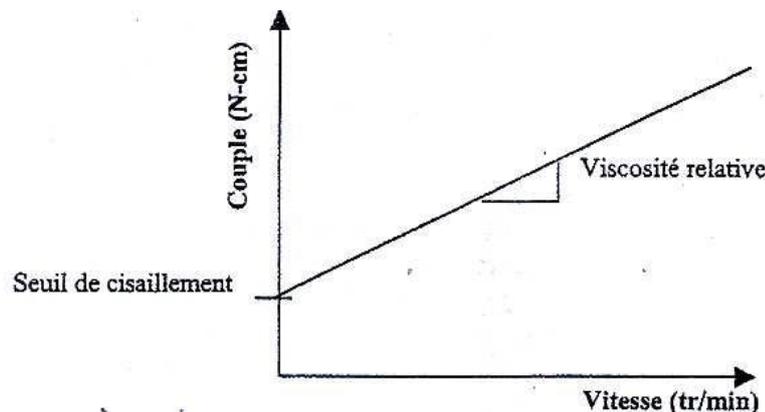


Figure I.5: Représentation du comportement rhéologique des BUHP [1]

Bonneau a montré que les BUHP, qui sont visqueux et très collants, sont des matériaux thixotropes, dont la viscosité apparente est fonction décroissante de la vitesse de déformation, et que les propriétés rhéologiques diminuent dans le temps dès la fin du malaxage. La composition du mélange, le temps de malaxage, le dosage optimal en super-plastifiant et la température affectent le comportement rhéologique des BUHP. Bonneau a aussi montré que les constituants utilisés adsorbaient une quantité croissante de super-plastifiant selon l'ordre suivant : fumée de silice, quartz broyé, ciment. L'adsorption dépend fortement de la surface spécifique. [1]

I.5.2. Résistance en compression et module d'élasticité

La définition des BFUHP suppose que la résistance en compression est très élevée. Pour les bétons, le comportement est quasi-fragile et ce phénomène s'accroît avec l'augmentation de la résistance en compression. Ainsi un BFUHP sans fibres explose littéralement lors de la rupture en compression simple. Un tel phénomène a été photographié par Graybeal. On peut noter la fin très nette de résistance sur la courbe contrainte/déformation lors d'un essai de compression simple (figure I.6). L'ajout des fibres permet alors de modifier très largement le comportement du matériau sollicité en Compression simple. Elles permettent de supprimer le caractère fragile du béton. La ductilité alors acquise est visible sur la **figure I.6**.

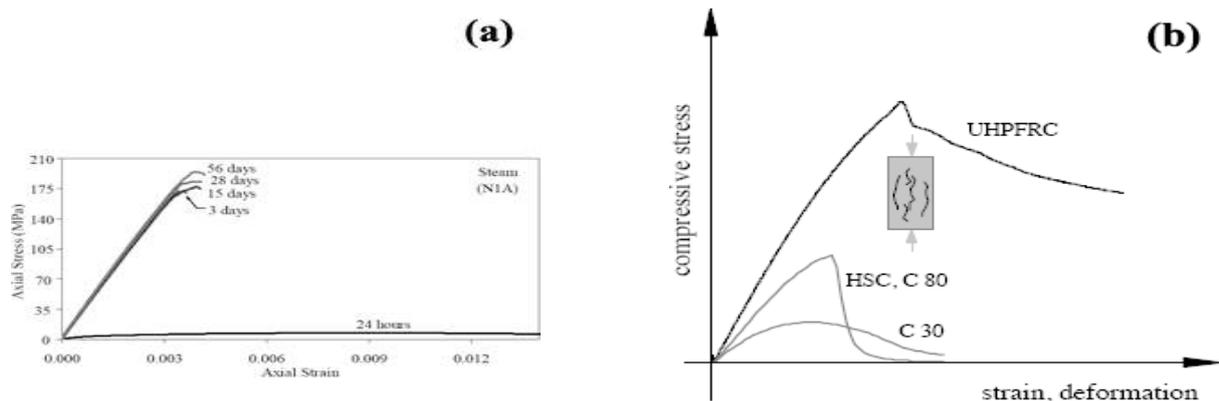


Figure I.6: Courbes typiques de résistance en compression : (a) d'un béton à ultra hautes performances sans fibres métalliques d'après Graybeal, et (b) d'un BFUP d'après Spasojevic.

En ce qui concerne l'évolution du module d'élasticité avec la température, la (figure I.7) montre celles du BFUHP BSI (sans pré charge) et du Ductile (avec pré charge à 20% de la capacité portante de l'éprouvette). Si on avait une augmentation ou une stagnation de la résistance.

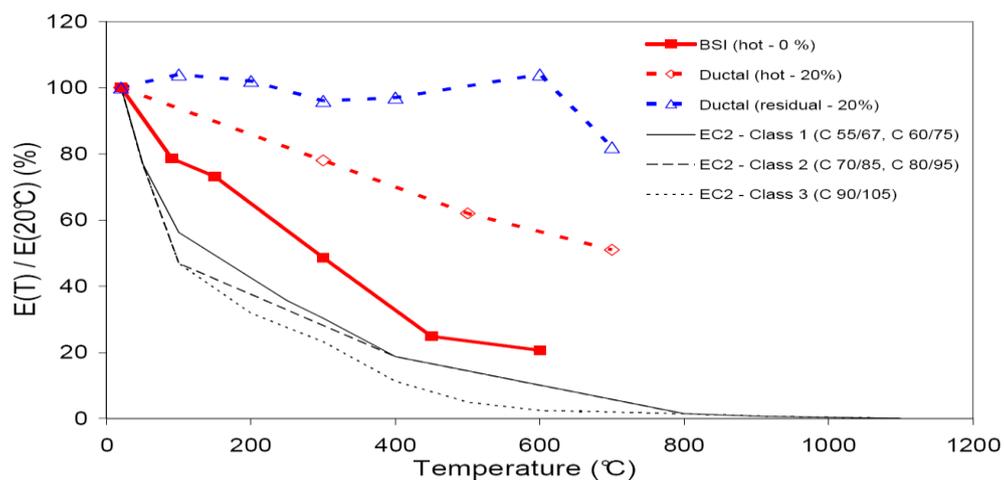


Figure I.7: Evolution en fonction de la température de module d'élasticité du Ductal et du BSI d'après Pimienta.

Pour la compression et la traction entre 25°C et 300°C, ce n'est pas le cas pour le module d'élasticité. Plus exactement, seul l'essai effectué après refroidissement et avec un chargement à 20% de la capacité fournit une stabilisation de la raideur du matériau entre 250°C et 600°C.

La figure résume le fait que la diminution du module d'élasticité est la plus rapide pour une assai à chaud sans pré-charge. Puis la pré-charge densifie le matériau, ce qui permet d'avoir une diminution plus lente avec la température.

Enfin, l'essai résiduel avec pré-charge permet d'obtenir une stabilisation du module jusqu'à 600°C.[1]

I.5.3 Résistance en flexion

Dans le cas des BUHP non fibrés, la résistance aux efforts de flexion ne dépasse pas les 8 MPa et présente une rupture fragile. De ce fait, leur comportement mécanique est linéaire élastique jusqu'à la rupture.

L'addition de fibres entraîne une augmentation significative des résistances et une augmentation de la ductilité. Le comportement post-pic de rupture est fortement amélioré, pour les BUHP fibrés sans pressage avec une résistance à la flexion de l'ordre de 20 MPa.

I.5.4 Résistance à la traction

En ce qui concerne la caractéristique de traction des BFUHP, le gain apporté par la combinaison fibres/compacité de la pâte est très intéressant. En effet, les fibres agissent comme de micro armatures qui permettent d'obtenir des déformations importantes avant rupture. La (figure) montre les courbes schématiques que l'on peut acquérir pendant un essai de traction directe sur différentes catégories de bétons.

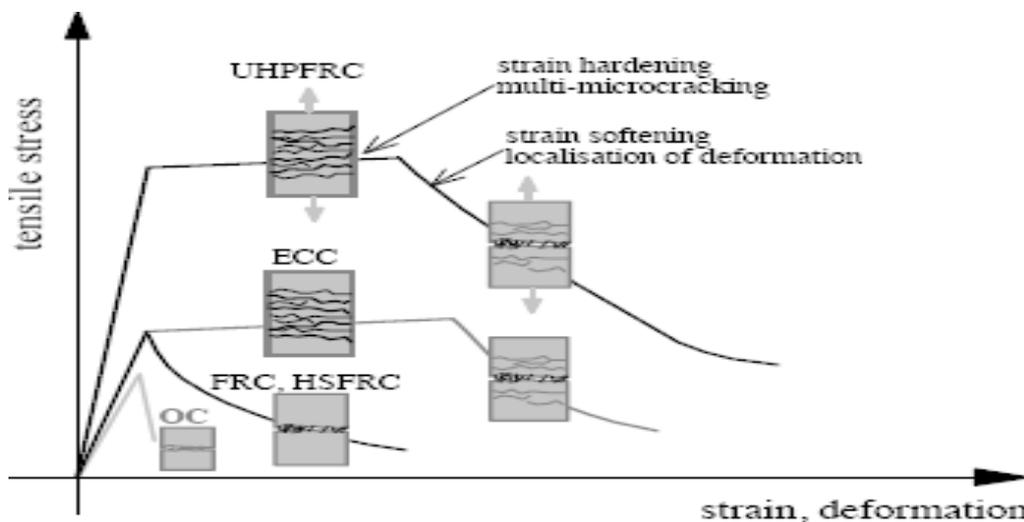


Figure I.8 : Courbe typique de résistance en traction directe d'un BFUHP et de bétons Ordinaires

Le comportement en traction est caractérisé par :

- Un domaine de déformation élastique limitée par la résistance en traction de la matrice cimentaire;
- Un domaine post-fissuration caractérisé par la résistance en traction du matériau fibré obtenue après fissuration de la matrice.
- Le comportement dans le domaine post-fissuration peut permettre pour certaines structures de s'affranchir des armatures classiques de béton armé. La résistance en traction des BFUHP est de l'ordre de 10 MPa.

N.B :L'augmentation du volume de fibres et la combinaison de fibres courtes et de fibres longues a permis d'obtenir un comportement ductile jusqu'à une ouverture de fissure de 400 μm selon [8].

I.5.3 Effets différés du BFUHP

Le BFUHP est un matériau cimentaire, et en tant que tel, il subit des effets différés tout comme le béton ordinaire. Avec des différences importantes, ce pendant.

I.5.3.1 Retrait

La composante principale du retrait du BFUHP provient du retrait endogène, au cours duquel l'eau est consommée par l'hydratation du ciment. Pour des éléments préfabriqués, l'effet du retrait est moins importante que pour les éléments coulés en place, car une grande partie se produit avant que les éléments ne soient assemblés sur le chantier, et n'a donc aucune influence sur le comportement de la structure dans son ensemble. Il faut cependant prendre garde que les coffrages soient conçus de manière appropriée pour éviter une fissuration au jeune âge du BFUHP, alors qu'il se trouve encore dans le moule. Après le traitement thermique (s'il est nécessaire), le retrait résiduel est pratiquement nul. (3)

- Retrait endogène : 300 à 500 $\mu\text{m}/\text{m}$.
- Retrait de dessiccation : 50 à 100 $\mu\text{m}/\text{m}$.
- Retrait total : 5000 à 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$.(6)

I.5.3.2 Fluage

Le fluage est une augmentation graduelle de la déformation sous contraintes constantes. En plus d'une augmentation des flèches des éléments en flexion, le fluage a pour conséquence une réduction de l'effort de précontrainte par suite du raccourcissement de l'élément. Les valeurs observées du fluage pour les éléments en BFUHP sont très basses, avec un coefficient final de fluage ϕ de l'ordre de 0.6.

Pour les éléments qui ont subi un traitement thermique, cette valeur s'abaisse à approximativement 0.2.

Dans l'ensemble, les effets différés sont bien moins importants pour le BFUHP que pour les éléments en béton ordinaire, même s'ils ne sont pas complètement négligeables, notamment au jeune âge.(3)

Grâce à la faible teneur en eau du matériau et à l'utilisation de fumées de silice, la déformation sous charges permanentes (fluage) est très fortement réduite. Les valeurs de coefficient de fluage à long terme sont de 0,8 pour les matériaux sans traitement thermique et 0,2 dans le cas d'un traitement thermique sont pris en compte pour le dimensionnement des ouvrages en BFUHP.

Les propriétés spécifiques en termes de retrait (quasiment nul) et fluage (très faible) permettent de maîtriser toutes les difficultés de conception liées aux déformations différées. Elles sont particulièrement intéressantes pour la réalisation d'ouvrages précontraints par post tension ou pré-tension car les pertes de précontrainte sont ainsi fortement réduites

I.5.4 Traitements thermiques

Sachant que dans notre travail ce type de traitement ne peut être effectué suite à l'utilisation des fibres polypropylène non résistant à la température élevée. Le comportement mécanique particulier des BFUHP et des BFUHP traités thermiquement peut s'expliquer à partir de la nature cristalline des phases des hydrates. Le diagramme de Verbeck et Copeland cité dans des phases des produits d'hydratation des silicates montre les différentes phases de C-S-H

formées sous un traitement thermique en fonction du rapport molaire CaO/SiO₂ noté C/S (Figure I.9).[4]

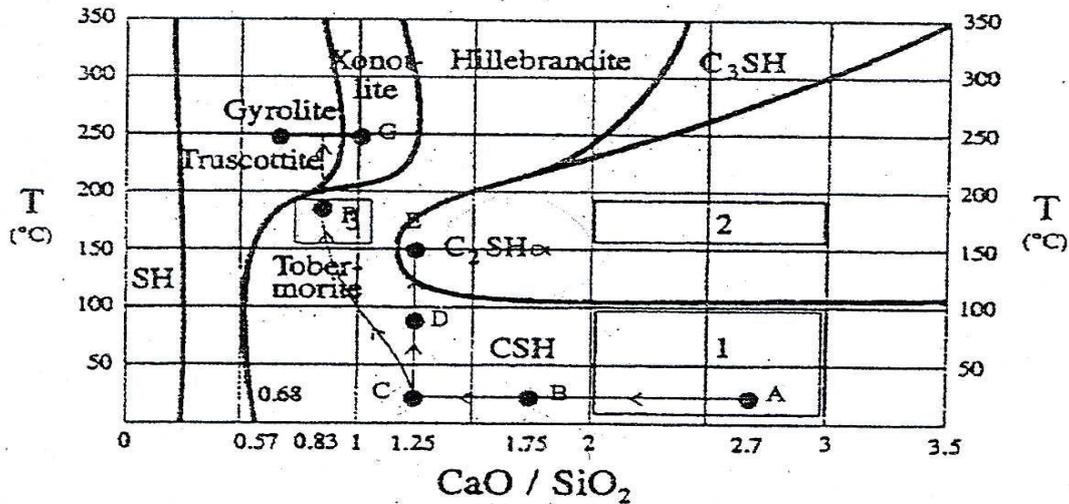


Figure I.9 : Diagramme de phase des C-S-H [4]

A 20°C, le rapport C/S du ciment anhydre correspond à une valeur de 2,7 (point A) qui diminue à 1,75 (point B) durant l'hydratation et la formation des C-S-H. Si l'on ajoute de la fumée de silice, et grâce à la réaction pouzzolanique, on passe d'un rapport C/S de 1,75 à 1,25 (Point C).

Si on chauffe ce composé (point C) au-delà de 100°C, on forme une phase cristalline C₂SH α (Point E) dont les propriétés mécaniques sont très médiocres [Taylor, 1990]. Pour atteindre les points F et G, qui correspondent à la formation de tobermorite et dexonolite (hydrates présentant de très bonnes propriétés mécaniques), on ajoute du quartz broyé en quantité qui va réagir lors du chauffage au-delà de 150°C (vers les 180°C), pour atteindre des hydrates de rapport C/S de 0,83.

Le but d'utiliser le traitement thermique :

Les BFUHP peuvent faire l'objet de traitements thermiques juste après la fin de leur prise, ce qui permet:

- d'obtenir des résistances mécaniques élevées très rapidement.
- d'obtenir des performances en traction et en compression plus élevées.
- d'améliorer la microstructure.
- d'améliorer la durabilité grâce à une réduction de la porosité.
- de diminuer les effets différés du retrait et du fluage.
- d'éviter tout risque de fissuration par retrait.

Après traitement thermique, le retrait est quasi inexistant et le fluage très fortement réduit.(4)

I.5.5 Microstructure et durabilité des BFUHP

Du fait de leur microstructure extrêmement dense, de leur porosité capillaire très faible et de leur compacité, les BFUHP présentent des caractéristiques de durabilité exceptionnelles, quel que soit l'environnement, notamment dans les domaines suivants :

- Résistance aux cycles gel-dégel, résistance aux sels de déverglaçage, à l'eau de mer, aux sulfates, résistance à la carbonatation, résistance à la pénétration d'ions agressifs et des acides faibles, résistance à l'abrasion, aux chocs, excellente tenue aux températures élevées ainsi qu'aux ultraviolets.
- La matrice cimentaire des BFUHP constitue un milieu quasi imperméable à l'air et à la pénétration des divers agents agressifs.

Particularité des BFUHP selon la microstructure

Les BFUHP sont des matériaux à structure micrométrique. La microstructure des BFUHP est la clé de leurs performances. Elle leur confère une très faible porosité.

Les composants des BFUHP varient du millimètre au nanomètre. Le dosage en eau est inférieur à celui nécessaire pour l'hydratation complète du ciment. Les BFUHP possèdent ainsi une réserve de ciment anhydre qui leur procure un potentiel d'auto cicatrisation en cas de fissuration.

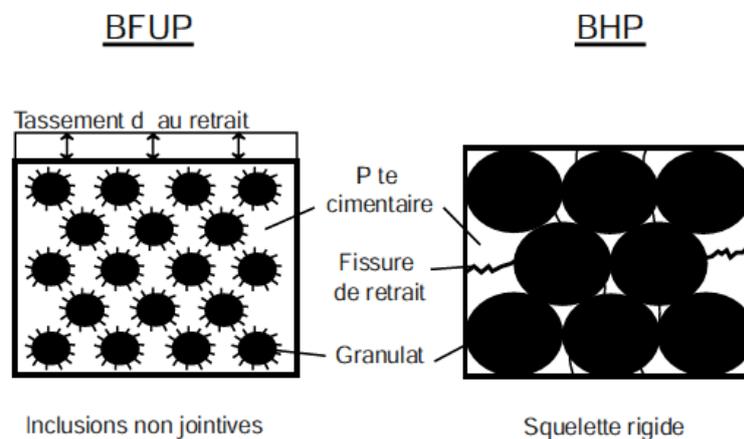


Figure I.10 : Effet de la souplesse du squelette granulaire sur le retrait endogène et la microfissuration

L'eau pénétrant éventuellement par les fissures va permettre la formation d'hydrates au sein des microfissures en réagissant avec les grains de clinker résiduel. Ce phénomène constitue un atout particulièrement intéressant en termes de durabilité pour ce matériau. La figure suivante(Figure) représente la déférence de section polie de BFUHP et de BO.



Béton classique(BO) BFUHP
Figure I.11:déférence de section polie de BFUHP et Béton classique(6)

I.5.6 Absorption d'eau

Plusieurs recherches ont été menées sur l'absorption d'eau des BFUHP afin d'évaluer la pénétration des agents agressifs au sein du matériau. Roux et al [Roux et al, 1995] ont réussi à mesurer une absorption d'eau des BFUHP inférieure à $0,2 \text{ kg/m}^2$ après 15 jours, à comparer aux $2,75 \text{ kg/m}^2$ pour le béton ordinaire. Le BFUHP est considéré comme un matériau possédant une porosité capillaire très faible et un matériau cimentaire très durable [4].

I.5.7 Carbonatation

Roux et al n'ont pas enregistré de carbonatation sur des BFUHP conservés à l'air libre ou en ambiance accélérée à 100 % de CO_2 . A ce jour, aucune étude n'a évoqué la carbonatation de ce matériau.[3]

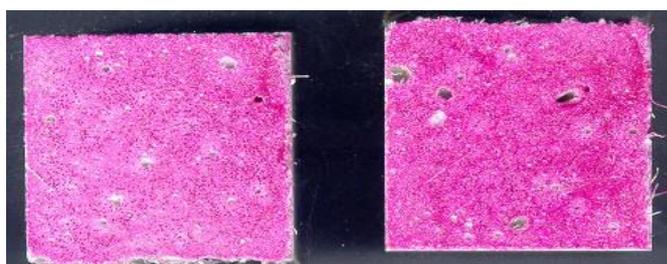


Figure I.12 : La carbonatation d'un matériau

La coloration uniforme rose, due à la Phénolphthaléine, montre que le PH du BFUHP est toujours de 13. Si de la Calcite s'était formée, par pénétration du CO_2 , le PH serait voisin de 10, la zone attaquée serait colorée en blanc.

I.5.8 Auto-cicatrisation des fissures

- Grâce à un rapport E/C très faible (0.25) et à un fort dosage en ciments ($\approx 700 \text{ kg/m}^3$) le BFUHP conserve une grande quantité de clinker résiduel
- Teneur résiduelle en clinker (%)
 - BFUHP 50 à 60
 - BHP..... 5 à 10
 - Béton B25..... 0
- Les grains de clinker disponibles peuvent s'hydrater en atmosphère humide, pour former des hydrates qui cicatrisent les microfissures(7)

Propriétés	Valeurs
Porosité	2 % à 5 %
Carbonations : pénétration sur 15 mm	> 12000 ans
Corrosion : coefficient de diffusion effectif	0,02
Coefficient de diffusion des ions chlorurent	$2 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$
Perméabilité à l'oxygène	$< 10^{-9} \text{ m}^2$

Tableau I.7 : Représente quelque valeur sur la durabilité de BFUHP

Ces valeurs sont données à titre indicatif, elles dépendent du type de BFUHP, de sa formulation et de son procès de fabrication. Certaines valeurs sont extraites du guide AFGC, pour la présentation des modes opératoires des essais, il convient de s’y reporter.

I.5.9 Influence du rapport E/C

La réduction du rapport E/C est un des principes de formulation des BFUP pour atteindre des résistances mécaniques élevées. Généralement, ce rapport est autour de 0,2 pour les BFUP. La Figure 1 - 9 représente la relation entre la résistance moyenne en compression et le rapport E/C des BFUP. Les valeurs présentées sont obtenues pour les BFUP sans traitement thermique.

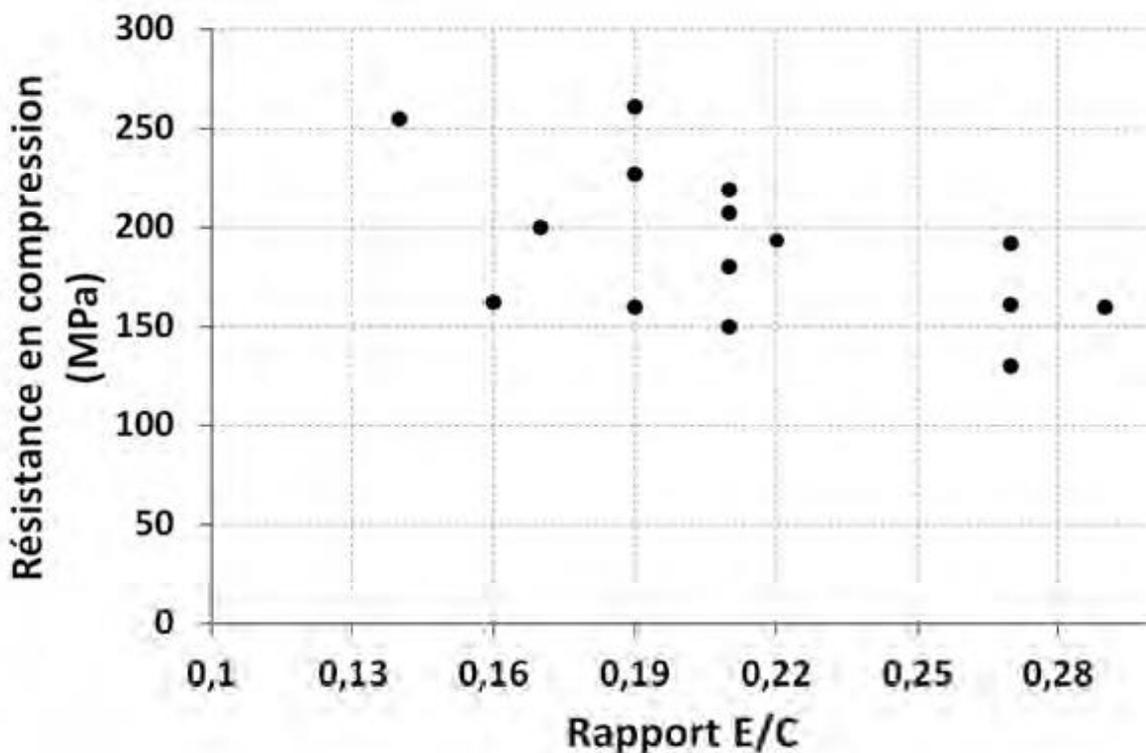


Figure I.13 : Influence du rapport E/C sur la résistance moyenne en compression

Nous pouvons constater une tendance générale d’augmentation des résistances en compression lorsque le rapport E/C diminue. Cependant, à rapport E/C égal à 0,27, les valeurs de résistance varient de 130 MPa, et des variations semblables peuvent être observées pour des valeurs de rapport E/C de 0,19 et de 0,21. Ceci signifie que le rapport E/C est un paramètre important, mais pas le seul à impacter la résistance en compression.[3]

I.5.10 Influence de la teneur en fibres :

Globalement, la teneur en fibres influe peu sur la résistance en compression, sauf quand celle-ci dépasse un dosage volumique de 2%. La Figure présente les valeurs de résistance moyenne en compression à 28 jours en fonction de différentes teneurs en fibres métalliques.[9]

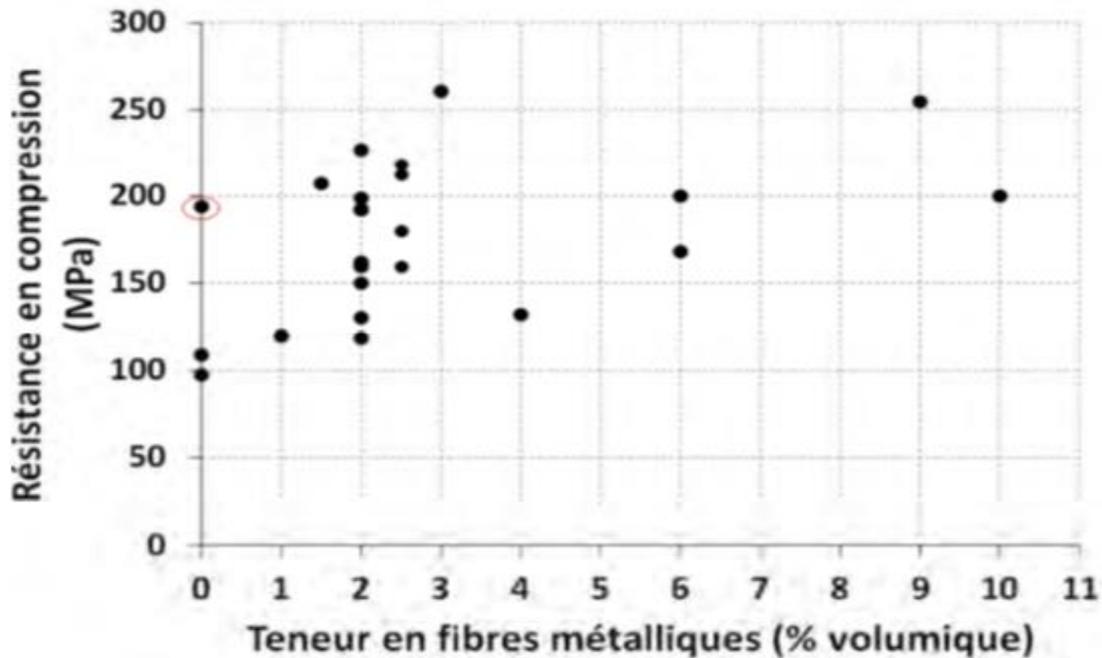


Figure I.14 : Résistances en compression en fonction de la teneur en fibres métalliques

Sur cette figure, nous pouvons constater la tendance observée par Mr. Behloul, qui a montré que l'incorporation des fibres dans les BUHP entraîne une augmentation de 5% à 10% de la résistance en compression lorsque le dosage en fibres atteint 4% volumique. Il a aussi montré une amélioration de 9% de la résistance en compression lorsque le taux d'incorporation de fibres passe de 1 à 4% volumique. Les fibres métalliques peuvent être incorporées dans la matrice cimentaire en quantité importante jusqu'à 10% volumique comme dans les BFUHP de la gamme CEMTEC, sans provoquer une amélioration substantielle de la résistance en compression. Sur la base de ces données, nous pouvons constater qu'une majorité d'études sont réalisées avec des dosages volumiques en fibres de 2 ou 2,5%, avec des résistances en compression variant entre 119 MPa et 261 MPa. Ces dosages sont considérés comme un bon compromis entre les performances mécaniques recherchées et le prix. Des récentes études ont montré qu'il est possible d'obtenir une résistance en compression de 180 MPa sans ajout de fibres par amélioration de la compacité du mélange.[9][10]

I.5.11 Mise en œuvre

La mise en œuvre des BFUP peut se faire avec ou sans vibration, ceci dépend de sa consistance et de sa fluidité. Il faut toutefois éviter les hauteurs de chute supérieures à 0,5 m. Dans le cas contraire, il faut justifier par une étude de la faisabilité vis-à-vis des fibres (absence de ségrégation et/ou formation d'oursin). Il est également recommandé d'effectuer des coulages continus pour réduire le phénomène de dessiccation entre les couches. Pour le bétonnage par temps froid, les recommandations pour les bétons classiques s'appliquent aux BFUP. C'est-à-dire que, lorsque la température est inférieure à +5°C, tout bétonnage est déconseillé, sauf dispositions particulières :

- _ Réchauffage des granulats et/ou de l'eau de gâchage.
- _ Utilisation de coffrages en bois épais ou isolés.
- _ Utilisation d'un adjuvant accélérateur de prise et de durcissement.

Les corps d'épreuves doivent être confectionnés afin de valider les performances mécaniques au jeune âge avant le décoffrage, à l'instant du levage des pièces, et à long terme. En fin, la cure des BFUP est systématique et doit être soignée afin d'empêcher la dessiccation du béton avant sa prise, et sa microfissuration pendant la prise (AFGC, 2013).

I.5.12 Domaine d'utilisation :

Nouvelles construction (préfabriquées ou bétonnées en place)	Renforcement et/ou réhabilitation (élément mixtes BFUP-béton)	Eléments non structurels
<ul style="list-style-type: none">• Dalles minces• Dalles nervurées• Poutres légères• Élément de façade architectonique• Coffrage perdu servant de peau aux éléments très exposés (bordures de ponts. STEP)• Têtes d'ancrages• Parois anti-bruits• Pieux battus• Consoles des balcons	<ul style="list-style-type: none">• Couches minces appliquées de façon monolithique sur un élément en béton existant a fin d'en augmenté sa durabilité et/ou sa capacité portante (dalles de roulement, colonnes, parapets et ponts)• Élément localement très sollicités mécaniquement (articulations, joints) couches de protections et à haute résistance a l'abrasion pour l'industrie ou les ouvrages hydrauliques• Élément de protection contre dynamiques (chocs, explosions)	<ul style="list-style-type: none">• Mobilier• Œuvres d'art• Objets design• Caisson de stores

I.6. Les avantages de BFUHP

- une bonne ouvrabilité.
- des résistances caractéristiques à la compression à 28 jours très élevées comprises entre 130 et 250 MPa, ainsi qu'à la traction (valeur comprise entre 5 et 12 MPa).
- de hautes résistances à court terme (24 heures).
- des résistances mécaniques au jeune âge très élevées.
- une compacité très importante.
- une durabilité exceptionnelle.
- une ductilité (déformabilité sous charge sans rupture fragile) importante.
- une ténacité (résistance à la microfissuration) élevée.
- un retrait et un fluage très faible.
- une dureté de surface très importante.
- une grande résistance à l'abrasion et aux chocs, une faible perméabilité.
- des aspects de parements particulièrement esthétiques et une texture de parement très fine.
- de nouvelles perspectives constructives.

I.7. Inconvénient

- Son coût élevé.
- Son application aux structures ordinaires difficiles.

LA NANO-SILICE

Ce chapitre est consacré à donner des généralités sur l'utilisation de la nano-silice dans les bétons en particulier dans les bétons spéciaux. Nous présentons dans ce chapitre la définition, la méthode de production de la nano-silice ainsi que son Rôle dans les bétons entant qu'ajout cimentaire.

II.1 Introduction

En termes de construction, le ciment est le produit dominant comme liant qui se fixe et durcit indépendamment ainsi que les autres matériaux liés. Le mortier de ciment est un composé de construction créé en mélangeant l'agrégat fin et une sélection de matériel de cimentation avec une quantité spécifiée d'eau. L'introduction de la nanotechnologie a considérablement influencé le paysage scientifique et a entraîné des changements majeurs dans le comportement des matériaux. L'utilisation des nanoparticules dans les matériaux de construction cimentaires, mortier et béton, font l'objet de plusieurs recherches. Le fait que les recherches prouvent que les nanoparticules influencent positivement le comportement de ce matériau, à la fois comme charge et comme composant réactif, c'est-à-dire l'agent de liaison.

Dans le mortier, les nanoparticules ont un potentiel très prometteur en raison de leur taille ultrafin (10-9m). Les nanoparticules, à la fois comme chargeur ou liant, pourraient améliorer les performances de la zone de transition inter-faciale entre les agrégats et la matrice de ciment ainsi que d'augmenter la qualité globale de la matrice de ciment elle-même. L'introduction de nanoparticules permet de créer un même produit identique avec une meilleure microstructure, sans modifier le contenu chimique du produit lui-même. De nombreux travaux de recherche ont été menés au cours de la dernière décennie, soulignant l'utilité des nanomètres.

II.2 Définition

La silice est le nom commun des matériaux composés de dioxyde de silicium (SiO_2) et se présente sous forme cristalline et amorphe. La nano-silice ou la (NS) est un sous-produit du procédé de fusion dans l'industrie du silicium et du Ferro-silicium finement broyé. L'institut américain du béton définit les nano-silice comme «silice non cristalline très fine. Il s'agit d'une poudre de couleur blanche, elle est une poudre ultrafine recueillie en tant que sous-produit de la production d'alliage de silicium et de Ferro-silicium et se compose de particules sphériques ayant une taille de particule très petit, ayant une grande surface spécifique.

Tout comme la fumée de silice, dans le béton, la NS a l'effet pozzolanique ainsi que l'effet fillers.



Figure II.1 : la poudre de nano-silice

II.3 Méthode de production de nano-silice :

De nos jours, il existe différentes méthodes pour produire des produits NS. Une méthode de production est basée sur un procédé sol-gel à température ambiante. Dans ce processus, les matériaux de départ (principalement Na_2SiO_4 et organométalliques comme TMOS / TEOS) sont ajoutés à un solvant et le pH de la solution est changé, atteignant la précipitation du gel de silice. Le gel produit est vieilli et filtré pour devenir un xérogel. Ce dernier est séché et brûlé ou dispersé à nouveau avec des agents de stabilisation (Na, K, NH_3 , etc.) pour produire une dispersion concentrée (20 à 40% de matière solide), apte à être utilisée dans l'industrie du béton. [11]

Une autre méthode de production est basée sur la vaporisation de silice entre 1500 et 2000 ° C en réduisant le quartz (SiO_2) dans un four à arc électrique. En outre, NS est produit en tant que sous-produit de la production de métaux de silicium et d'alliages de Ferro-silicium, où il est recueilli par condensation ultérieure à fines particules dans un cyclone. La nano-silice produite par cette méthode est une poudre très fine constituée de particules sphériques ou de microsphères avec un diamètre moyen de 150 nm avec une surface spécifique élevée (15 à 35 m^2 / g). Des chercheurs ont développé une méthode biologique pour produire une distribution étroite et bimodale de NS à partir de l'humus digéré de vers rouge de Californie (entre 55 nm et 245 nm selon la température de calcination). Grâce à ce procédé, des nanoparticules de silice ayant une forme sphérique peuvent être obtenues avec une efficacité de procédé de 88%. Ces particules ont été produites en nourrissant des vers avec de la coquille de riz, un matériau de déchets biologiques contenant 22% de SiO_2 équivalent. En outre, la NS peut également être produit par la méthode des précipitations. Selon ce procédé, la NS est précipité à partir d'une solution à des températures entre 50 et 100 ° C, et s'appelle silice précipitée.[11][12]

En outre, la nano-silice (NS) est en cours de développement via une autre voie de production. Fondamentalement, l'olivine et l'acide sulfurique sont combinés, grâce à quoi la silice amorphe précipitée avec une finesse et une pureté élevées mais une forme agglomérée est synthétisée (particules de taille nanométrique comprise entre 6 à 30 nm) et même plus verte (CO_2 moins élevée) que la micro-nano-silice contemporaine.

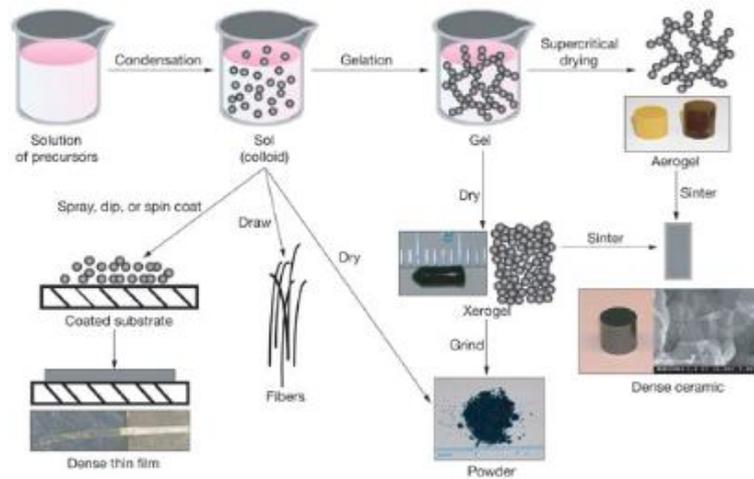


Figure II.2 : schéma simplifié de fabrication de la nano-silice (sol-gel)

II.4 Effet de l'addition NS dans le béton et les mortiers

En béton, la NS, autrement dit la micro-silice a principalement deux mode d'action, en premier lieu l'effet pozzolanique, la réaction de la silice avec l'hydroxyde de calcium forme plus de CSH. La deuxième fonction est physique, car la micro-silice est environ 100 fois plus petite que le ciment. La micro-silice peut combler les vides restants entre les particules de ciment, en augmentant sa densité finale. Certains chercheurs ont constaté que l'ajout de 1 kg de micro-silice permet une réduction d'environ 4 kg de ciment, et cela peut être plus élevé si la NS est utilisée. L'addition de nano-silice dans la pâte de ciment et le béton peut entraîner des effets différents. L'effet d'accélération dans la pâte de ciment est bien rapporté dans la littérature. Le principal mécanisme de ce principe de fonctionnement est lié à la surface élevée de NS, car elle fonctionne comme site de nucléation pour la précipitation de C-S-H. Cependant, il n'a pas encore été déterminé si une hydratation plus rapide du ciment en présence de NS est due à sa réactivité chimique sur la dissolution (activité pozzolanique) ou leur activité superficielle considérable. Aussi l'effet d'addition de la NS a été établi indirectement en mesurant le changement de viscosité (rhéologie) de pâte de ciment et de mortiers. Les résultats des tests de viscosité ont montré que la pâte de ciment et le mortier avec addition de NS nécessitaient plus d'eau pour maintenir la facilité de travail des mélanges constante, il a également conclu que NS présente une tendance plus forte à l'adsorption d'espèces ioniques dans le milieu aqueux et la formation d'agglomérats est attendue. Dans ce dernier cas, il est nécessaire d'utiliser un additif dispersant ou un plastifiant pour minimiser cet effet.

Ji a étudié l'effet de l'addition NS sur la perméabilité et la microstructure de l'eau en béton.

Différents mélanges de béton ont été évalués en incorporant des particules de NS de 10 à 20 nm (SSB de 160 m² / g), cendres volantes, gravier et plastifiant pour obtenir le même temps de chute que pour le béton normal et le béton à base de NS. Les résultats des tests montrent que la NS peut améliorer la microstructure et réduire la perméabilité à l'eau du béton durci. Lin et al. a démontré l'effet de l'addition NS sur la perméabilité de l'éco-béton. Ils ont montré avec un test de porosimétrie au mercure que la perméabilité relative et les tailles de pores diminuent avec l'addition de NS. La diminution de la perméabilité dans le béton avec une teneur élevée en cendres volantes (50%) et des concentrations similaires de NS (2% de la

puissance NS) a été rapportée par l'analyse microstructurale du béton par différentes techniques de microscope électronique a révélé que la microstructure du béton a base de NS est plus uniforme et plus compacte que pour le béton normal.(Ji) a démontré que la NS peut réagir avec des cristaux de Ca (OH) .ce qui rend la zone de transition inter-faciale des agrégats et du ciment de liaison Pate plus dense. Les particules de NS remplissent les vides de la structure de CSH et servent de noyau à Adhérer étroitement aux particules de CSH. Cela signifie que l'application de NS réduit la lixiviation des pâtes de ciment et donc augmentation de leur durabilité. L'effet le plus signalé de l'addition de NS est son l'impact sur les propriétés mécaniques de Béton et mortiers. Comme cela a été expliqué précédemment, l'addition de NS augmente la densité, réduit la porosité, et améliore le lien entre la matrice de ciment et les agrégats. Cela produit un béton qui présente une résistance à la compression et à la flexion supérieure. En outre, on a observé que l'effet de NS dépend de la nature et de la méthode de production (poudre colloïdale ou sèche). Même si l'effet bénéfique de l'addition de NS est limité, sa concentration sera contrôlée à un niveau maximal de 5% à 10% de base, selon l'auteur ou la référence. À des concentrations élevées de NS, le rétrécissement autogène dû à l'auto-dessiccation augmente, entraînant par conséquent un potentiel de craquage plus élevé. Pour éviter cet effet, une concentration élevée de super-plastifiant et d'eau doit être ajoutée et des méthodes de durcissement appropriées doivent être appliquées.

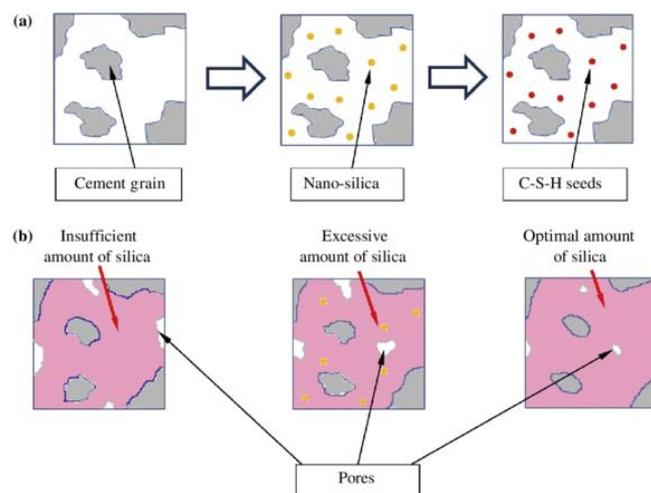


Figure II.3 : Schéma indiquant effet de NS sur les BFUHP

II.5 Mécanisme et mode d'action de la NS

La NS dans un matériau cimentaire agit selon un mode d'action double : physique (effet filler ou granulaire) et chimique (effet pouzzolanique).

➤ Effet filler :

La relation entre la granularité et la porosité d'un mélange de grains est une question assez ancienne. Caquot en 1937 a établi de façon empirique une loi exprimant la porosité minimale P_{min} d'un assemblage de grains, comme une fonction de la dimension minimale, d , et maximale, D , des grains qui le constituent : $p_{min} = p_0 \sqrt{d/D}$

Avec p_0 un coefficient de proportionnalité qui dépend de la maniabilité du béton.

Cette approche montre que pour diminuer la porosité minimale, il faut augmenter l'étendue granulaire [d-D]. En ajoutant de la FS dans un matériau cimentaire, ses particules fines, lisses et sphériques pénètrent et s'empilent dans les espaces interstitiels restés vides entre les grains de ciment de diamètre 100 fois plus grand (30 à 100 μm). En effet, pour un dosage de 10% de fumée de silice par masse de ciment, environ 50000 à 100 000 microsphères sont ajoutés pour chaque grain de ciment. Dans ce cas, le mélange sera suffisamment « imprégné » de fines particules et cette addition entraînera une augmentation de la surface spécifique interne d'un ordre de grandeur.

➤ **Effet pouzzolanique**

Au premier jour de la prise, la fumée de silice est considérée comme inerte et joue plutôt un rôle physique. Mais au fur et à mesure de l'avancement d'hydratation, après 1 à 2 jours du commencement des réactions d'hydratation du ciment la fumée de silice réagit avec l'hydroxyde de calcium pour produire des C-S-H. La figure suivante nous montre l'évolution de la quantité de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en présence de FS et l'influence de cette dernière sur la vitesse de l'hydratation.

II.6 Domaine d'applications de la nano-silice

- Constructions en béton à haute performances et ultra haute performances.
 - Peintures et vernis.
- Résines polyester insaturé, résines au contact et
- gel-coats.
 - Caoutchouc silicone HTV et RTV-2 c.
 - Colles et mastics.
 - Encres d'imprimerie.
 - Compounds pour câblerie et gels pour câbles.
 - Produits phytosanitaires.
 - Cosmétique

METHODOLOGIE et CARACTERISATION des MATERIAUX

L'objectif de Notre travail pratique est d'étudier l'introduction de la nano silice par substitution dans la formulation d'un béton fibré ultra hautes performances. La nano silice a été introduite au premier lieu par substitution de ciment, l'injection été dans l'eau de gâchage. Au deuxième lieu par substitution de poids de super-plastifiant, l'injection de la nano dans ce dernier, afin de voir leur influence sur les propriétés physico-mécaniques du béton. Pour réaliser ce travail, la méthodologie suivit et les différentes caractéristiques des constituants entrant dans la composition du BFUHP, seront présentées dans ce chapitre. Les matériaux utilisés dans ce travail, sont d'origine locale Pour cela, nous avons procédé à la caractérisation de chaque constituant du béton.

Objectif visé par ce travail:

Le but essentiel de cette étude, est de voir le mode d'introduction de la nano silice le plus convenable, efficace, facile et économique, pour produire un béton fibré ultra hautes performances (BFUHP) avec une qualité supérieure. Pour cela, la méthodologie du travail employer est la suivante.

III. 1. Méthodologie du travail

La méthodologie poursuite pour réaliser notre étude, se traduit dans le plan suivant:

-Caractérisation des matériaux utilisés.

- Ciment CEM I ;
- Sable de dune OUED SOUF
- Fumé de silice
- Nano silice
- Les fibres
- L'eau de gâchage
- Le super-plastifiant

-Formulation des bétons (BFUHP) étudiés, à savoir les variantes des BFUHP à base de différents dosages.

1. BFUHP témoin

2. BFUHP (**mode I**) a base de différents dosages de poudre de nano silice injecté dans l'eau de gâchage par substitution de poids de ciment.

3. BFUHP (**mode II**) a base de différents dosages de poudre de nano silice injecté dans le super-plastifiant par substitution de poids de se dernier.

-La campagne d'essais réalisée sur les Bétons formulés, et sera comme suite : physiques et mécaniques des éprouvettes élaborées

1. A l'état frais

2. A l'état durcis

L'écrasement des éprouvettes, est réalisé après leur conservation dans des sacs en plastique et a deux âges (2j et 28j).

-Résultats des essais effectués avec leurs interprétations ;

-Et enfin, une conclusion générale clôture notre travail.

III.2. Caractérisation des matériaux utilisés :

Dans ce chapitre, on traite la détermination des caractéristiques des différents constituants entrant dans la composition de notre mortier. La connaissance de leurs caractéristiques est impérative à toute recherche ou étude d'investigation, puisque chacune pourrait influencer considérablement sur les résultats d'étude. Pour cela, on a procédé à la caractérisation de chaque constituant.

III.2.1 Caractérisation des ciments

Il s'agit d'un ciment sans ajouts CEM I (CPA), qui est obtenue par le broyage du clinker plus 4 % de gypse a 40 min de temps de broyage. Sachant bien l'importance de ce composant dans béton, ainsi que les analyses physiques sont effectuées dans les conditions générales des essais :

-L'atmosphère des essais : la température de la salle d travail est de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, l'humidité relative est de 65% et la pression atmosphérique est normale.

-L'eau utilisée est l'eau potable (eau du robinet) qui contient peu de sulfate et dont la température est de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Ces analyses consistent à déterminer selon les normes en vigueur, le temps de prise, la stabilité et la consistance normale de ciment utilisé. Ainsi que le point de saturation de super-plastifiant (dosage maximale de ce dernier).

III.2.1.1 Caractéristiques chimique et minéralogiques

III.2.1.1.1 La composition chimique :

L'essai chimique est réalisé suivant les modalités de la norme **NF EN 196**.

oxyde	SiO₂	Al₂O₃	CaO	MgO	K₂O
teneur	21.55	4.28	62.31	1.70	0.57
oxyde	Na₂O	SO₃	Fe₂O₃	CaO libre	Cl⁻
teneur	0.13	2.15	4.75	1.063	0.021

Tableau III.1 : composition chimique d'un CEM I

III.2.1.1.2 La composition minéralogique

L'essai minéralogique est réalisé suivant les modalités de la norme **NF EN 196-4**

Phase	Constituants minéraux du Clinker	1.1 Teneur rapportée au Clinker (%)
Clinker	C₃S	51
	C₂S	23
	C₃A	03
	C₄AF	14
	CaO_L	01
Régulateur de prise	Gypse	04

Tableau III.2 : composition minéralogique de CEMI

III.2.1.2 Caractéristiques physique

III.2.1.2.1 Surface spécifique de BLAINE (SSB) NF EN 196-6

Ciments	Poids spécifique g /cm³	SSB cm²/g
CEM I	3.2	4286

Tableau III.3 : la surface spécifique de CEM

III.2.1.2.2 Consistance normale NF EN196-03

Ciments	Volume d'eau (ml)	Masse de ciment (g)	Consistance normale (%)
CEM I	135	500	27

Tableau III.4: la consistance normale de CEM I

III.2.1.2.3 Début et fin de prise : NF EN196-03

Propriétés	CEM I
Début de prise	150 min
Fin de prise	220 min

Tableau III.5 : début et fin de prise de CEM I

III 2.1.3 Caractéristiques mécaniques

III.2.1.3.1 La résistance à la compression et à la flexion

Les essais sont réalisés suivant les modalités de la norme **NF EN 196-1** sur des éprouvettes prismatiques 4X4X16 [cm].

	Résistance à la compression (MPa)			Résistance à la flexion (MPa)		
	2j	7j	28j	2j	7j	28j
CEM I	20.3	40	53.5	4.4	6.3	6.6

Tableau III.6 : Les résistances à la compression et à la flexion de CEM I

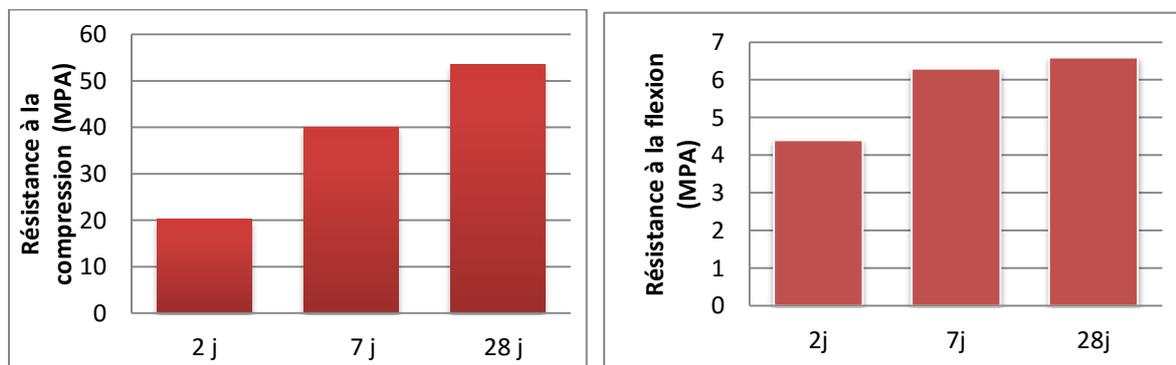


Figure III.1 : Les résistances à la compression et à la flexion de la pâte de ciment pur

La figure précédente est un histogramme représentant l'évolution de la résistance mécanique à la compression et à la flexion de la pâte de ciment à 2, 7 et 28 jours. De ces résultats, on peut dire qu'elle correspond à un CEM I 52.5.

D'après les résultats présentés dans la figure, on remarque l'évolution des résistances dans le temps d'une façon différente aux âges de telle sorte que :

➤ **A 2 jours** :

Les CEM I donnent des résistances en compression remarquables, grâce à leur composition contenant des teneurs en aluminates de calcium, qui forment les premiers cristaux hydratés responsables du durcissement initial et des premières résistances, par formation de l'ettringite.

➤ **A 7 jours :**

Les silicates de calcium hydratés de C₃S constituent la vraie structure du ciment durci et donnent des résistances à jeune âge, sur cette base on peut expliquer l'évolution de la résistance à 7 jours pour le CEMI.

➤ **A 28 jours :**

Concernant les résistances à 28 jours, le C₂S et C₃S contribuent aux résistances à moyen et à long terme, les CEM I a des bonnes résistances et qui peuvent développer plus en fur et a mesure.

III.2.2 Sable de dune

Le sable utilisé pour notre travail, est de provenance OUED SOUF, un sable fin, doré de couleur et dont la dimension maximale des gros grains est de 3mm.

III.2.2.1 Les caractéristiques du sable

III.2.2.1.1 Caractéristiques physiques

Caractéristique	Résultats	Unité
Masse volumique apparente	1,53	g/cm ³
Masse volumique absolue	2,66	g/cm ³
ESV	90.05	%
ESP	75.26	%
La teneur en eau	3.15	%
Porosité	2.75	%

Tableau III.7: Caractéristiques physiques du sable OUED SOUF.

III.2.2.1.2 Analyse granulométrique

Le tableau suivant représente l'analyse granulométrique du sable OUED SOUF.

M = 1000g

Ouverture de tamis en (mm)	Poids (g)		Pourcentage (%)		MF	Fraction fine (%)
	Refus partiel (g)	Refus cumules (g)	Refus cumules (%)	Tamisât (%)		
5	3.4	3.4	0.34	99.66	2.44	6
2.5	63.6	67	6.7	93.3		
1.25	180	247	24.7	75.3		
0.63	206	453	45.3	54.7		
0.315	346	799	79.9	20.1		
0.16	70.4	869.4	86.94	13.06		
0.080	95.3	964.7	96.47	3.53	-	
Fond de tamis	31.8	996.5	99.65	0.53		

Tableau III.8 : analyse granulométrie de sable OUED SOUF

Pour le module de finesse (M_f) :

- 1.8 et 2.2 : le sable est à majorité de grains fins,
- 2.2 et 2.8 : on est en présence d'un sable préférentiel,
- 2.8 et 3.3 : le sable est un peu grossier. Il donnera des bétons résistants mais moins maniables.

Alors que pour la fraction fines :

Le pourcentage des fines ne doit pas dépasser les 15%. Cet essai est généralement établie pour les sables des dunes le faite qu'il sons une granulométrie riche en fines.

III.2.2.1.3 Essais de bleu de méthylène

	M (g)	V (ml)	M_B
Sable OUED SOUF	212	30	1.42

Tableau III.9 : essai au bleu méthylène

III.2.3 Les poudres fines

Les poudres fines utilisées pour produire des bétons (BFUHP) sont différentes, dans notre travail, on a utilisé les poudres suivantes :

- La fumée de silice
- La nano silice

III.2.3.1 La fumée de silice (FS)

La fumée de silice utilisée dans cette étude est un produit commercialisé par SIKA. La fumée de silice densifiée utilisée pour les bétons hautes performances et haute durabilité, elle est Conforme à la norme NF P 18-502 et NF EN 13263-1. Le SIKA S95 est une silice ultra-fine issue de l'industrie de la fabrication du silicium ou des alliages à base de silicium.

III.2.3.1.1 Caractéristiques chimiques de la fumée de silice

Composition chimique	Contenue
SiO ₂	95% (≥92%)
Na ₂ O _{éq}	0,60% (≤ 1,0%)
SiC	1,50% (≥ 3,0%)
SO ₃	0,10% (≤0,20%)
Oxydes (Fe, Al, Mg, Ca)	1,00% (≤1,50%)
Cl ⁻	0,06% (≤0,20%)

Tableau III.10 : composition chimique de la fumée de silice

III.2.3.1.2 Caractéristiques physique

Propriétés physique	Résultat
Densité apparente (Kg/m ³)	0,40 à 0,45
Densité réelle (Kg/m ³)	2,24
Surfaces spécifique BET (m ² /g)	23 (20 à 26)
couleur	grise

Tableau III.11: caractéristiques physiques de la fumée de silice

III.2.3.1.3 Caractères généraux

La fumée de silice SIKA S95 DM confère aux bétons les propriétés suivantes :

- améliore les performances mécaniques à longs termes : résistances en
- compression, flexion et traction
- augmente le module d'élasticité
- réduit le fluage
- améliore la résistance à l'abrasion et à l'érosion
- améliore la durabilité en milieux agressifs
- diminue les risques d'expansion dus aux phénomènes d'alcali-réaction
- diminue la perméabilité aux gaz et aux liquides
- facilite le pompage de tous les bétons mêmes peu dosés en ciment,
- réduit les risques de ségrégations

III.2.3.1.4 Domaines d'application

La fumée de silice SIKA S95 DM permet de fabriquer des :

- BHP et BTHP
- Bétons résistants aux milieux agressifs :
 - domaines agricoles : ensilage, stockage d'engrais, aires de stabulation, ...
 - milieu industriel : industriels chimiques et agro-alimentaires, sucreries, conserveries, laiteries, bacs de retentions, ...
 - stations-services : béton en contact d'huiles et de carburants
 - aires de lavage
 - milieu marin : digue, aménagement portuaire, ...
 - zone de montagne : présence d'eau pure ou de sels de déverglaçage
 - stations d'épuration, égouts, caniveaux, ...
- Bétons pompables
- Bétons projetés

III.2.3.2 La nano-silice

La nano silice utilisé dans notre études et qui porte le nom de *AEROSIL * 200* est une silice pyrogénée hydrophile sous forme de poudre blanche ultra fine.

III.2.3.2.1 Propriétés physico-chimique :

Propriété	unité	Valeur indicatives
Surface spécifique(BET)	m ² /g	200 ± 25
Teneur en humidité	% en masse	≤ 1.5
pH	-	3.7 – 4.7
Teneur en SiO₂	% en masse	99.8
Densité après tassement	g/l	Env. 50

Tableau III.12 : propriétés de la nano silice selon la fiche technique

III.2.3.2.2 Applications et propriétés

III.2.3.2.2.1 Applications

- Bétons à HUP
- Peintures et vernis.
- Résines polyester insaturé, résines au contact et
- gel-coats.
- Caoutchouc silicone HTV et RTV-2 c.
- Colles et mastics.
- Encres d'imprimerie.
- Compounds pour câblerie et gels pour câbles.
- Produits phytosanitaires.
- Cosmétiques.

III.2.3.2.2 Propriétés

- Contrôle de la rhéologie et thixotropie des systèmes liquides, des liants, des polymères, etc.
- Employé comme agent de suspension, agent épaississant et agent anti-coulures.
- Renforcement des caoutchoucs-silicone HTV et RTV-2 c.
- Amélioration de l'écoulement et anti-mottage des poudres

III.2.4 Eau de gâchage

L'eau utilisée pour le gâchage de béton est de l'eau potable de la ville de Tizi-Ouzou.

III.2.5 Les adjuvants

L'adjuvant utilisé est un super plastifiant haut réducteur d'eau, qui porte le nom « **UNICUM PC2** » fabriqué par l'entreprise **TEKNACHEM**, sa plage d'utilisation est fixée par la fiche technique.

Description

L'**UNICUM PC2** est un super plastifiant haut réducteur d'eau et accélérateur de durcissement pour béton. Il est conçu à base de poly-carboxylates pour l'obtention de résistances mécaniques initiales et finales élevées. Même par temps froid. Il fait partie de la nouvelle génération d'adjuvant. Il permet d'obtenir d'excellents résultats avec la majorité des types de ciments commercialisés.

III.2.5.1 Propriétés chimiques et physique

- Aspect : Liquide
- Couleur : Miel
- Densité (20°C) : 1.070(±0.02)
- pH (20°C) : 5.0 (±1)
- Extrait sec : 32%(±2%)
- Teneur en chlorures : ≤0.1%

III.2.5.2 Caractéristiques

- **UNICUM PC2** est recommandé pour bétons exigeants :
- Un rapport E/C très bas
- Un long maintien rhéologique
- Des résistances mécaniques élevées à jeune âge
- Un meilleur aspect au décoffrage
- Une meilleure durabilité
- Un ralentissement de la carbonatation
- Une diminution du retrait

III.2.5.3 Domaines d'application

UNICUM PC2 peut être utilisé pour

- Bétonnage par temps froid

- Béton prêt-à-l'emploi
- Béton architectural
- Béton précontraint
- Béton préfabriqué

III.2.5.4 Dosage

Le dosage de l'**UNICUM PC2** varie entre 0.5 à 2 % du poids de ciment soit 0.46 à 1.9 litre pour 100 kg de ciment. Le dosage optimal est déterminé en fonction des caractéristiques désirées, selon la composition du béton.

III.2.5.5 Mode d'emploi

L'addition de l'**UNICUM PC2** ne doit jamais se faire sur un béton sec (c'est-à-dire avant l'ajout de l'eau). Il sera absorbé par les agrégats et le sable d'où son inefficacité avec le ciment. Il est conseillé d'ajouter l'**UNICUM PC2** dans le béton après l'ajout des composants et environs 90% de l'eau de gâchage nécessaire. Terminer le mélange en ajoutant graduellement l'eau restant (10%) jusqu'à l'obtention de la consistance désirée.

III.2.6 Les fibres

Description

Granifibres sont des fibres en polypropylène qui, ajoutées au béton et au mortier, réduisent les fissurations et le faïençage. Les chapes réalisées avec l'addition de *Granifibres* présentent de meilleures résistances à l'abrasion et aux chocs.

III.2.6.1 Domaine d'application

- Hangars de stockages
- Parking
- Atelier mécanique
- Revêtements extérieurs
- Aires de circulation...

III.2.6.2 Propriétés

Les fibres dans le béton ou mortier créent un réseau fibré de haute densité, qui :

- Améliorent la cohésion à l'état frais
- Réduisent les fissurations de retrait et le « cracking »
- Résiste aux milieux alcalins
- Augmentent les résistances à l'abrasion et aux chocs, pouvant atteindre des valeurs 100 fois supérieures à celle de témoin (sans fibres)

III.2.6.3 Caractéristique

- Longueur..... 12 mm
- Point de fusion..... 150°C mm
- Densité (apparente).....0.9
- Module de Young3KN/mm²
- Allongement a la rupture50%
- Section de la fibre30 m

III.2.6.4 Mode d'emploi

- La quantité de **Granifibres** est ajoutée directement dans le malaxeur avec les composants du béton sec (sans eau).
- Si **Granifibres** est utilisé en dose, prolonger le malaxage de min, afin de dissoudre le sachet.
- Pour les mortiers de granulométrie inférieur a 10mm, il est préférable d'ajouter la quantité de fibres par dispersion manuelle

III.2.6.5 Consommation

Un sachet de 600g/m³ de béton. Deux sachets de 600g/m³ de mortier.

III.2.6.6 La mise en place du béton

Une bonne homogénéité des matériaux est nécessaire pour lui garantir son efficacité et le mode de vibration dépend essentiellement du type de béton utilisé.

FORMULATION des BETONS et METHODES d'ESSAIS

Des bétons fibrés ultra hautes performances (BFUHP), ont été élaborés afin de voir l'influence de la poudre ultra fines (nano silice) sur les performances du béton. Le sable de dune est utilisé comme granulat pour le béton. la nano silice est ajouté par substitution. Les principes de formulation, résultat, et interprétations seront exposé dans ce chapitre.

Trois composition des bétons on été élaborées, une composition témoin sans nano silice, les deux autres sont faites a base de NS selon deux mode. Le premier consiste a injecté la NS dans l'eau de gâchage par substitution de poids de ciment, le deuxième ce fait par injection de NS dans le super-plastifiant. On outre les autres constituants et le rapport E/L sont maintenues constats, avec une quantité variante de super-plastifiant selon le mode et les dosages de la nano-silice dans le mélange.

IV.1 Formulation des BFUHP :

Afin de voir l'influence des poudres fine nano silice (NS) sur les performances physico-mécaniques du BFUHP, des variantes des bétons ont été établies à partir du béton témoin (BT), Les BFUHP étudiés ont les dosages des constituants qui sont donnés dans le tableau suivant:

	Ciment (Kg)	Sable de dune (Kg)	Nano silice (%)	Fumée de silice (Kg)	Fibres polypropylène (g)	Adjuvant (en extrais. sec) (Kg)	L'eau (l)
BT	1075	1020	-	160	600	7.2	186
BI (mode I)	1065	1020	1	160	600	12.8	186
	1055		2			19.2	
	1045		3			28.8	
BII (mode II)	1075	1020	1	160	600	8.8	186
			2				
			3				

Tableau IV.1: quantité des constituants des BFUHP élaboré pour 1 m³

IV.2 Protocole des mélanges des bétons

Le Protocole de mélange des mortiers dans notre travail pour les trois compositions s'ai fait comme suite :

IV.2.1 Pour le béton témoin et le mode II

- Mettre l'eau et 2/3 de super plastifiant dans le récipient.
- Mettre le mélange de liant (Ciment + fines).
- Mélanger à vitesse lente pendant 3min ensuite raclé le bord et mélanger encore 3min.
- Verser le 1/2 de 1/3 de super plastifiant et le 1/3 de sable.
- Mélanger à vitesse lente pendant 2 min.
- Rajouter encore le reste de 1/3 super plastifiant et le 2ième 1/3 de sable.
- Mélanger à vitesse lente pendant 2 min.
- Rajouter le reste de sable (1/3) et ménager pendant 2min à vitesse lente.
- Disperser les fibres apprêt une minute de malaxage présidant.
- Enfin mélanger à vitesse rapide pendant 1min (le total 13 min).

Remarque : le super-plastifiant utilisé pour le **mode II** a été préparé 24 heures avant son utilisation, une préparation d'un super-plastifiant artificiel a base de celui utilisé dans

notre travail, avec substitution de poids se super-plastifiant par des dosages de nano-silice. Le mélange a été homogénéisé puis laisser en repos pendant 24 heures.

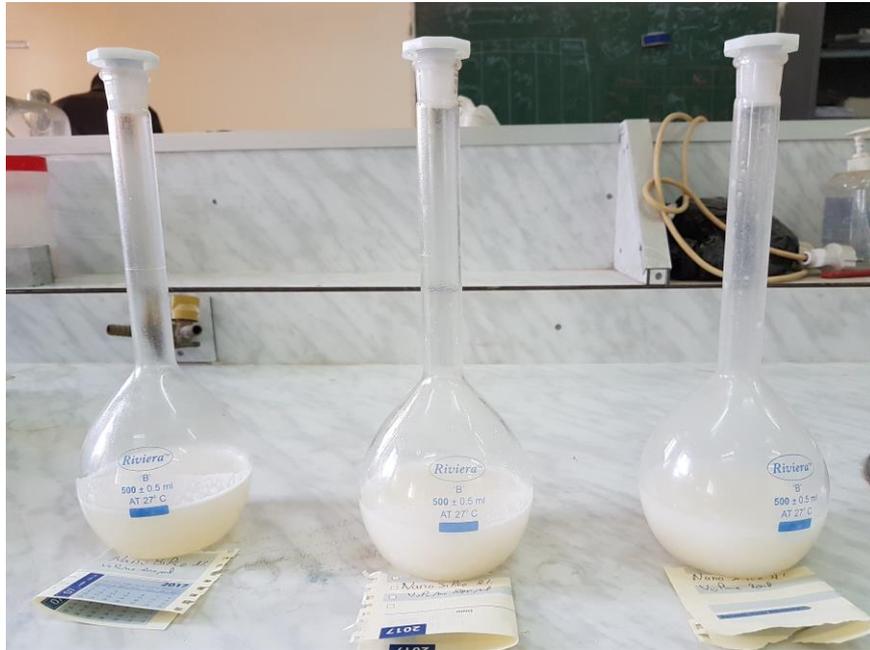


Figure IV.1 : le super-plastifiant après homogénéisation et repos

IV.2.2 Pour le mode I

- Mettre la quantité d'eau complète dans le récipient.
- Verser la dose de la nano silice doucement et avec précaution (masque, gants)
- Mélanger a vitesse lente pendant 3min ensuite raclé le bord et mélanger jusqu'à se que la poudre se solubilise dans l'eau complètement donnant un liquide très visqueux.
- Verser le mélange liant (ciment et fines) avec une spatule et d'une façon successive pendant le malaxage de 5min ensuite raclé le bord et mélanges encor 3min.
- Verser le $\frac{1}{2}$ de $\frac{1}{3}$ de super plastifiant et le $\frac{1}{3}$ de sable.
- Mélanger à vitesse lente pendant 2 min.
- Rajouter encore le reste de $\frac{1}{3}$ super plastifiant et le 2ième $\frac{1}{3}$ de sable.
- Mélanger à vitesse lente pendant 2 min.
- Rajouter le reste de sable ($\frac{1}{3}$) et ménager pendant 2min à vitesse lente.
- disperser les fibres apprêt une minute de malaxage présidant.
- Enfin mélanger à vitesse rapide pendant 1min (le total 17 à 18 min).

IV.3 Confection des éprouvettes

Pour les conduite des essais, des éprouvettes prismatique (4×4×16cm) ont été confectionnées pour chaque série variante des BFUHP. Après le démoulage, les échantillons ont été conservés à sec dans des sacs en plastique à la température ambiante (pour celle de 28 jours). Les essais effectués sont motionné ci-dessous. Toutes les séries des mélanges du béton ont été préparées en utilisant le même malaxeur (malaxeur a pales, utilisé pour les mortiers).

IV.4 Propriété déterminées des BFUHP

Les propriétés seront comparées avec celles de béton témoins sans nano silice. Les essais effectués sur les mortiers confectionnés sont comme suite :

IV.4.1 Propriétés à l'état frais :

- La fluidité

IV.4.2 Propriétés à m'état durci :

- Masse volumique
- Essai de l'ultrason
- Résistance a la flexion (2et 28 jours)
- Résistance a la compression (2et 28 jours)

RESULTATS et DISCUSSIONS

Après avoir effectué les essais physico-mécaniques sur les éprouvettes du béton fibré ultra haute performance, ce chapitre vient à donner les résultats de ces essais ainsi que leurs interprétations.

V.1 Propriétés de BFHUP a l'état frais :

V.1.1 Fluidité des bétons :

Pour chaque formulation du BFUHP, nous avons mesuré l'étalement du béton au mini cône. Les résultats de l'essai sont présentés dans le tableau V.1:

❖ **Notation** : Soit la nomenclature des mélanges des BFUHP étudiés suivante.

BT : BFUHP témoin.

BI (mode I) : BFUHP à base de nano silice injecté dans l'eau de gâchage.

BII (mode I) : BFUHP à base de nano silice injecté dans le super-plastifiant

➤ **L'étalement (l'étalement au mini cône)**

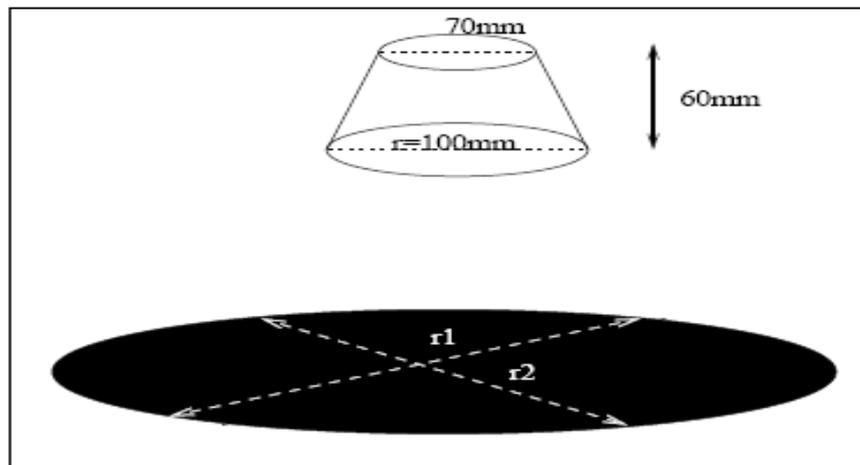


Figure V.1 : le principe de mesure de l'étalement

		Étalement (cm)	E/C	SP (ml)	Mv (Kg/m ³)	
BT			14	0.17	22.5	2.27
B(I)	1%		14.5	0.17	40	2.23
	2%				60	2.24
	3%				90	2.27
B(II)	1%		15	0.17	27.5	2.24
	2%				27.5	2.25
	3%				30	2.27

Tableau V.1: Caractéristiques des bétons étudiés à l'état frais à base de CEM I

Le tableau précédent représente les résultats de l'étalement obtenu après malaxage complet des bétons élaboré. Vu qu'on cherche à avoir un étalement fixe, pour but d'obtenir un béton maniable, sachant que tous les bétons préparé contiennent les fibres, et un rapport E/C fixe, on varie la quantité de super-plastifiant sans dépasser le point de saturation (3%) pour avoir l'étalement souhaité. L'essai au mini-cône des BFUHP étudiés, ont une moyenne d'étalement variant entre 14 et 15cm. d'après les dosages de SP injecté, on a observé clairement l'influence de l'incorporation de la NS sur la fluidité bétons. On effet, la NS a diminué la fluidité des bétons dans le mode I et à chaque fois que le dosage de la NS augmente, c'est pour cette raison qu'on a augmenté le dosage en SP pour atteindre l'étalement souhaité. Alors que dans le mode II l'influence de l'incorporation de la NS sur la fluidité des bétons a été légère.

Cela est expliqué que la NS qui est ultra fine absorbe une partie de l'eau de gâchage en diminuant l'hydratation du ciment et le fonctionnement de super-plastifiant qui diminue l'écoulement du béton.

V.2 Propriété des bétons à l'état durci

V.2.1 Masse volumique apparente des BFUHP

La masse volumique (apparente) a été déterminée en mesurant les éprouvettes des bétons après 28 jours de durcissement, par son volume total des éprouvettes. Les mesures des masses

des bétons étudiés sont données dans le tableau ci-dessus, les résultats peuvent être représentés dans la figure qui suit :

Variante	Masse volumique (g/cm³)
BT	2.369
MI 1%	2.367
MI 2%	2.365
MI 3%	2.361
MII 1%	2.365
MII 2%	2.366
MII 3%	2.367

Tableau V.2 : masses volumiques des bétons étudiés à 28 jours

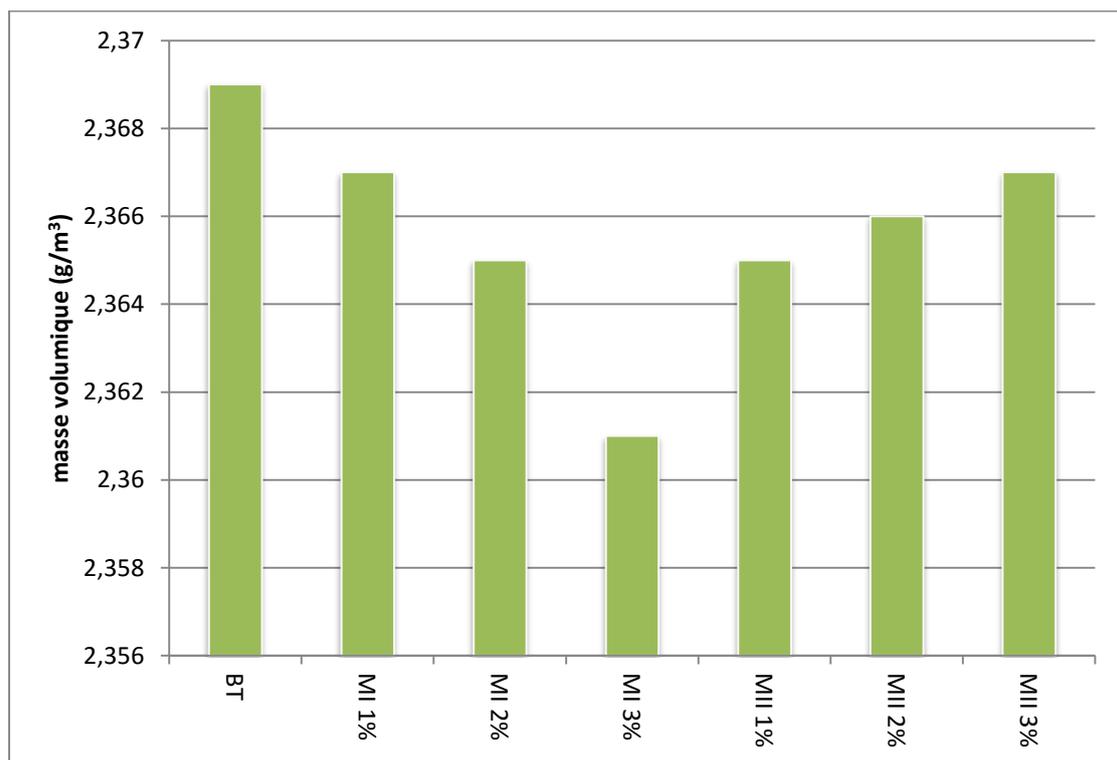


Figure V.2 : représentation de l'évolution de la masse volumique apparente des BFUHP élaborés

La figure représente l'évolution de la masse volumique apparente des BFUHP élaborés, on conclue, d'après les résultats obtenus, tous les échantillons ont une masse volumique identique que ça soit le mode ou le dosage de nano-silice dans les formulations. Alors que pour les mortiers de mode I (MI 3%) a 3% de nano-silice on touche une diminution

expliqué par la diminution de la teneur en ciment dans le mélange qui a été substitué partiellement par la NS qui a une masse spécifique moins que celle de ciment.

V.2.2 L'essai à l'ultrason

Cet essai, non destructif a pour but la mesure de la propagation du son dans les bétons élaborés. L'essai a été réalisé sur les éprouvettes à 28 jours, afin d'avoir une idée sur la compacité des bétons confectionnés. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau ci-dessus, et qui peuvent être repris dans la figure qui suit :

Variante	Vitesse de propagation (m/s)
BT	4938
MI 1%	4637
MI 2%	4470
MI 3%	4267
MII 1%	4776
MII 2%	4784
MII 3%	4790

Tableau V.3 : vitesse de propagation de son des bétons à 28 jours

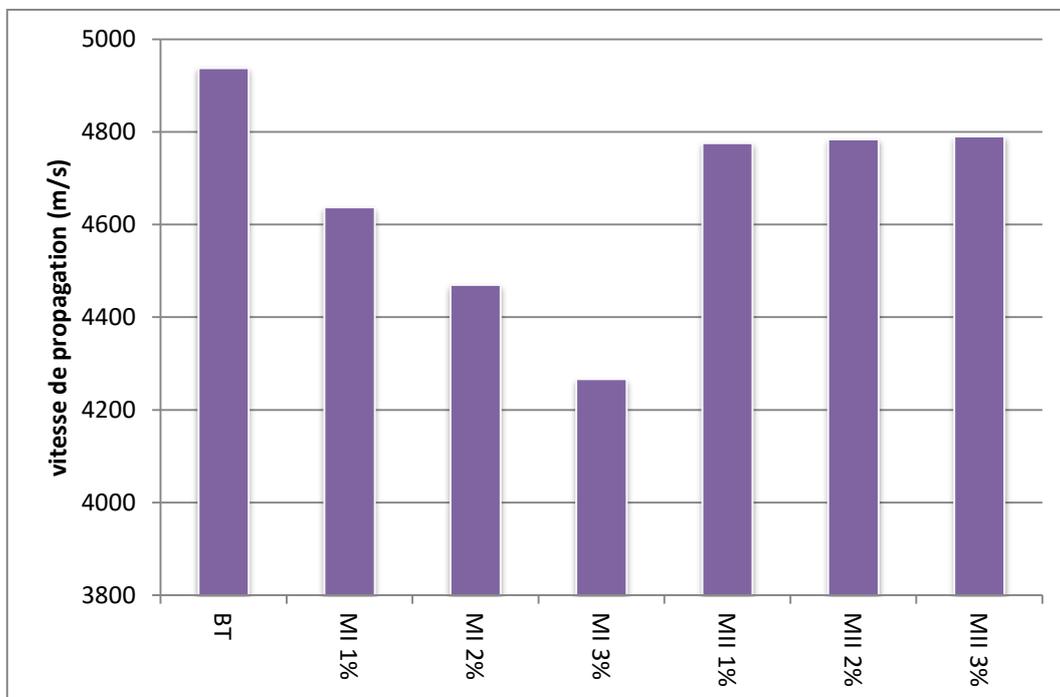


Figure V.3 : présentation graphique de vitesse de propagation par ultrason des mortiers à 28 jours

La figure précédente représente l'évolution de la vitesse de propagation de son mesuré par ultrason. D'après les résultats on constate que la vitesse de propagation c'est influencé par la masse volumique des bétons, plus elle augmente, plus la vitesse de propagation augmente, plus le béton est compact. On peut interpréter que le mode I et moins compact que le II sa explique que la NS n'a pas fait le rôle pouzzolanique.

V.2.3 Résistance mécanique des bétons :

Les essais mécaniques effectués sur les bétons durcis sont les suivants :

- La résistance mécanique à la compression
- La résistance mécanique à la flexion

A. Les éprouvettes pour essais des bétons

A.1 Préparation des éprouvettes

Pour effectuer cet essai, on a préparé trois éprouvettes (4*4*16) (cm), pour chaque âge (2, 7, 28 jours) dans le but de prendre une valeur moyenne.

A.2 Conservation des éprouvettes

Les éprouvettes préparées auparavant sont conservés a sec dans des sacs en plastique.

A.3 Réparation et positionnement des éprouvettes

Avant de passer à l'action d'écrasement, il faut tenir compte des recommandations suivantes :

- ❖ Essuyer toute humidité excessive de la surface d'éprouvette avant de la positionner dans la machine d'essai.
- ❖ Tous les plateaux de la machine d'essai doivent être essuyés et toutes particules ou corps étrangers retirés des surfaces de l'éprouvette qui seront en contact avec eux.
- ❖ Centrer l'éprouvette sur le plateau avec une précision de $\pm 1\%$

V.2.3.1 Résistance mécanique de Bétons témoin

Caractéristique	Résistance mécanique (MPa)			
	Résistance à la Compression		Résistance à la flexion	
Age	2j	28j	2j	28j
BT	70	83	7.40	9.86

Tableau V.4 : Résultats des essais mécaniques de béton témoin

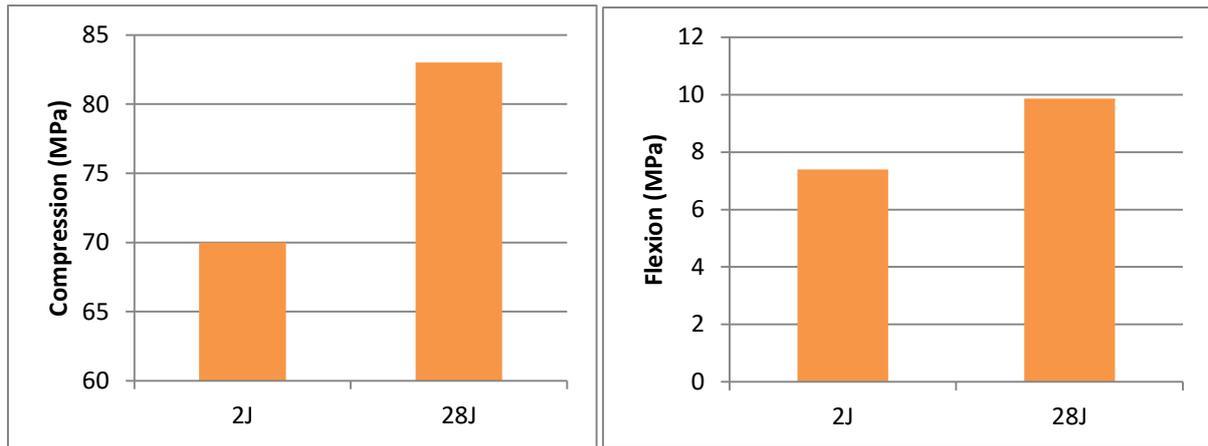


Figure V.4 : Résistance à la compression et à la flexion du béton témoin (sans NS)

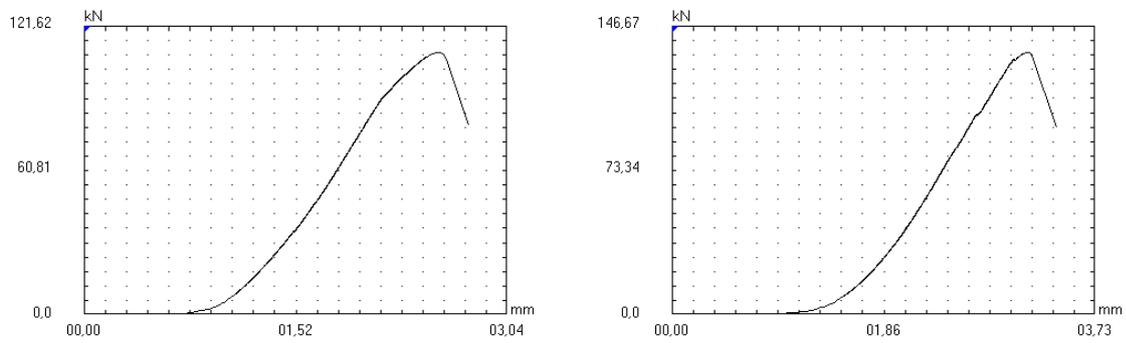


Figure V.5 : courbes contrainte déformation de compression du BT à 2 et 28 jours

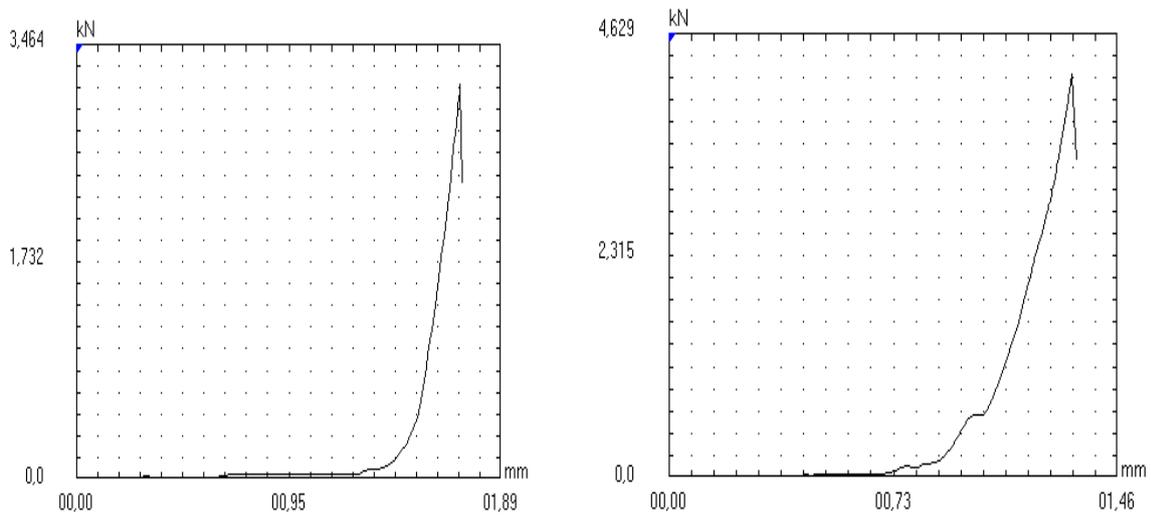


Figure V.6 : courbes contrainte déformation de flexion du BT à 2 et 28 jours

La figure V.4 représente l'évolution des résistances mécanique en fonction du temps, alors que pour les figures V.5, V.6, elles représentent les courbes contrainte déformation de béton témoin a 2 et 28 jours. Il est clair que les résistances en compression et en flexion prennent une fonction croissante en fonction de l'âge de durcissement comme les figures l'indiquent. Autrement dit les résistances augment à l'augmentation de l'âge de durcissement. Ceci est traduit par l'effet de l'hydratation des minéraux du clinker contenu dans le ciment utilisé. Les valeurs de résistance enregistrées sont environ 85 MPa et 10 MPa respectivement pour la résistance à la compression et à la flexion à 28 jours. Sans oublier le rôle de la FS avec son effet fillers et pouzzolanique qui a joué le jeu dans l'amélioration des résistances a la compression. Et les fibres qui ont donné une amélioration pour les résistances en flexion.

V.2.3.2 Résistance mécanique pour le premier mode :

Caractéristique		Résistance mécanique (MPa)			
		Résistance à la Compression		Résistance à la flexion	
Age		2j	28j	2j	28j
MI	1%	72	85	10.30	9.20
	2%	77	90	11.5	10.5
	3%	70	80	10.15	9.1

Tableau V.5 : Résultats des essais mécanique pour les bétons de premier mode

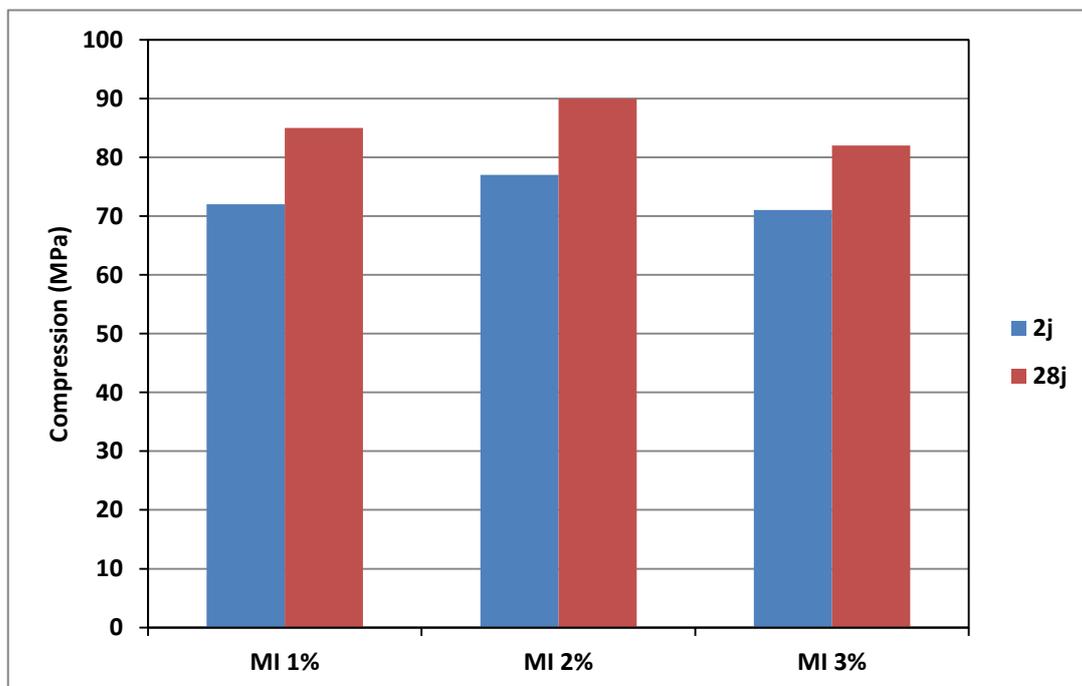


Figure V.7 : résistance en compression a 2 et 28 jours des bétons de premier mode

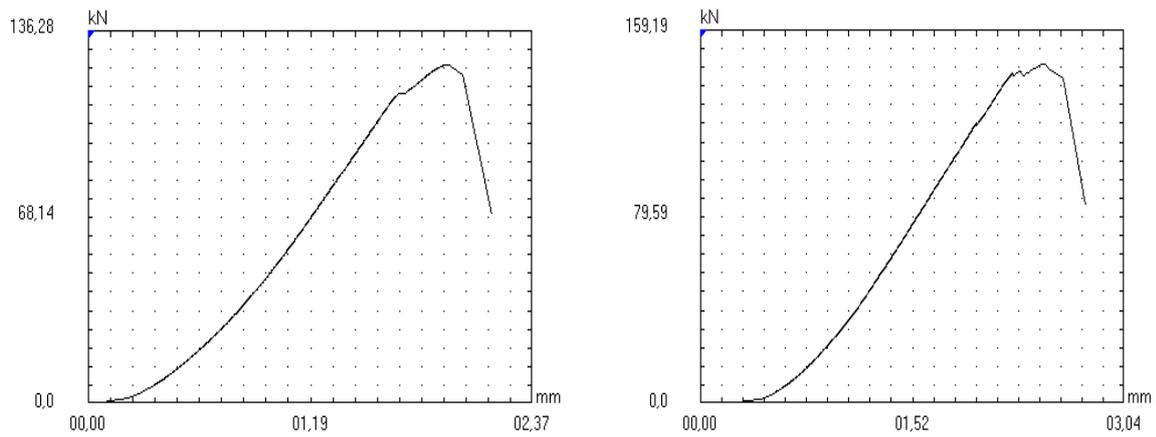


Figure V.8 : courbes contrainte déformation en compression à 2 et 28 jours pour le premier mode

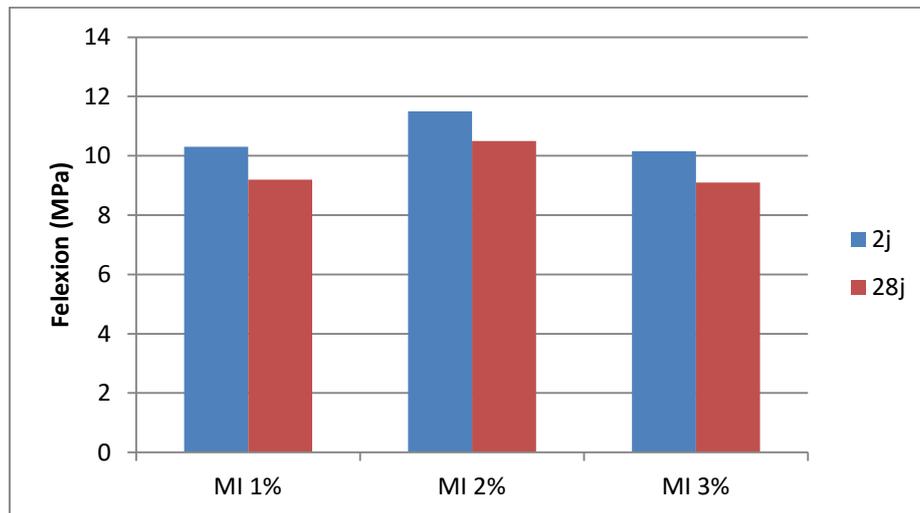


Figure V.9 : résistance a la flexion à 2 et 28 jours des bétons de premier mode

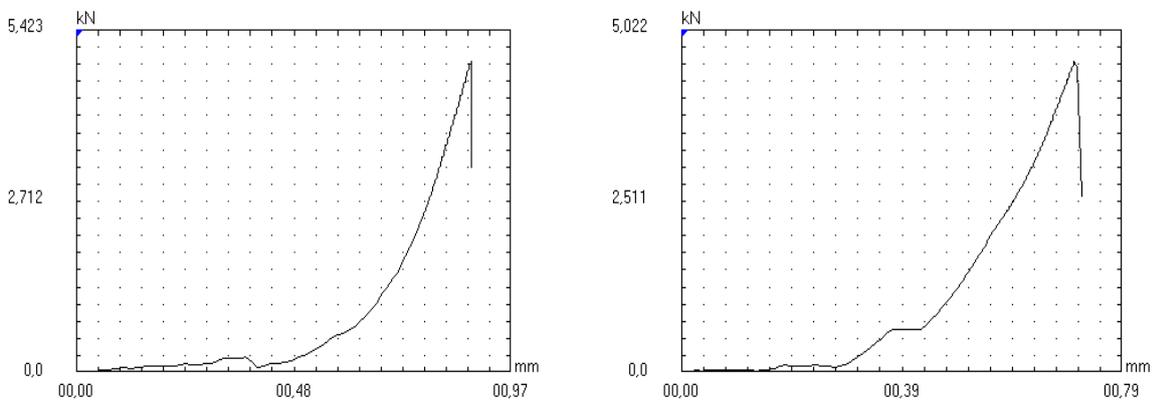


Figure V.10 : courbes contrainte déformation à la flexion 2 et 28 jours pour le premier mode

Les figures V.7 et V.9, représentent l'évolution des résistances en compression et en flexion en fonction du temps successivement. Alors que les figures V.8 et V.10, elles représentent les contraintes déformation en fonction de la force exercé. Comme les résultats l'indiquent la NS a importé des améliorations pour les résistances en compression a 2 et a 28 jours en comparant avec le témoin, il est clair que les 3 dosages en donnais une amélioration, en remarque que le dosage en 2% de NS a donnais les meilleures résultat entres eux. La même chose en flexion ou le dosage a 2% de NS a donné le meilleure résultat. Sauf que la résistance à diminuer en 28 jours qu'a 2 jours dans les 3 dosages cela est due à la finesse de la NS et qui se fixe autour des fibres, et qui après durcissement ses dernier vont jouer les rôle de granulats au lieu de réducteurs de fissuration. Aussi que le dosage en 1% a donné de résultat mieux que le dosage en 3% ce qui signifie l'excès de dosage en NS diminue les performances.

V.2.3.2 Résistance mécanique pour le deuxième mode :

Caractéristique		Résistance mécanique (MPa)			
		Résistance à la Compression		Résistance à la flexion	
Age		2j	28j	2j	28j
MII	1%	83	102	8.65	12.10
	2%	84	106	8.89	12.30
	3%	87	112	9.66	12.40

Tableau V.6 : Résultats des essais mécanique de deuxième mode

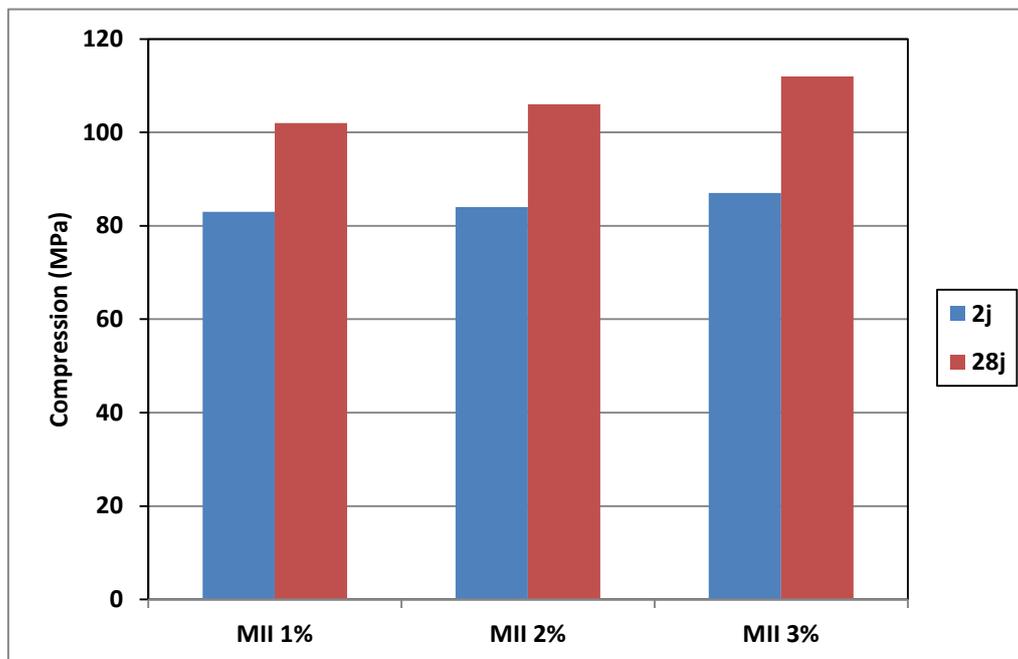


Figure V.11 : Résistance en compression à 2 et 28 jours des bétons de deuxième mode

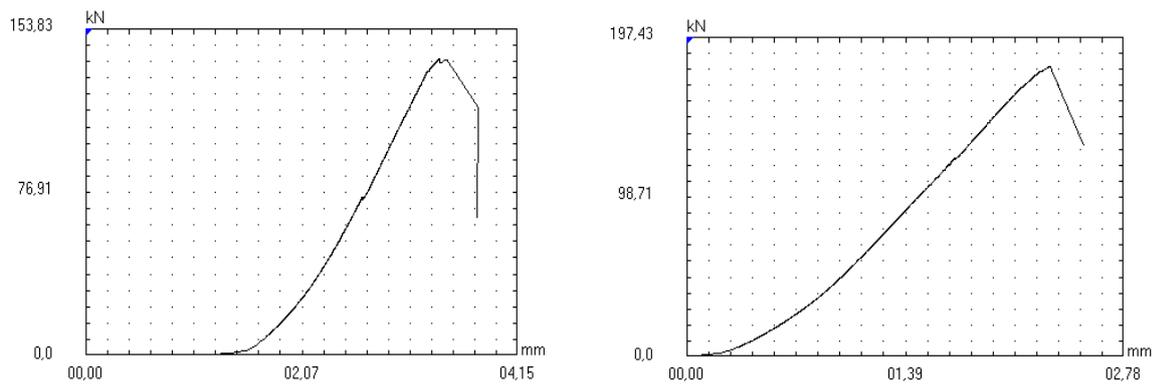


Figure V.12 : courbes contrainte déformation en compression à 2 et 28 jours des bétons de deuxième mode

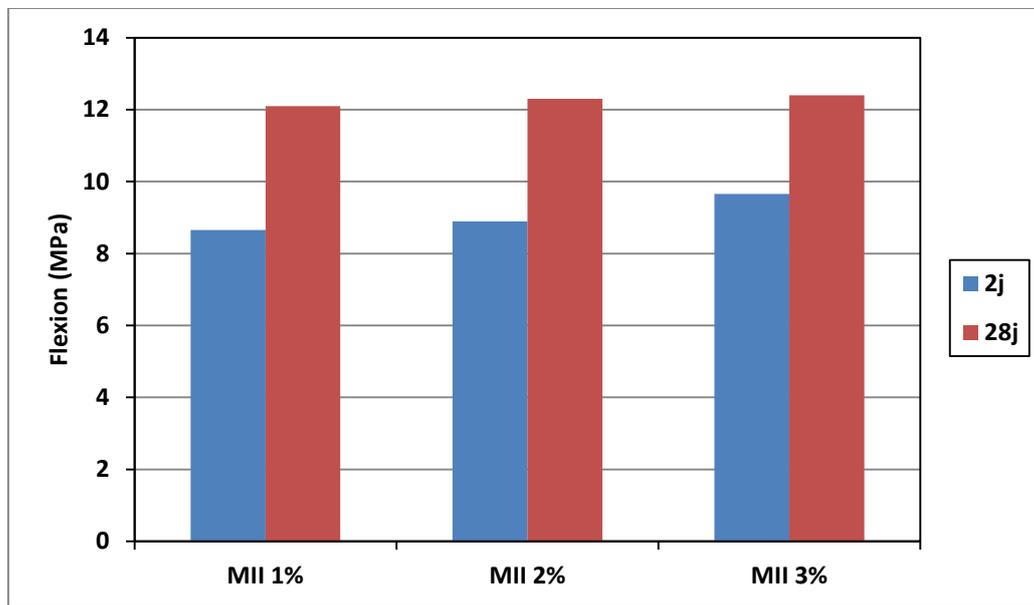


Figure V.13 : résistance en flexion à 2 et 28 jours des bétons de deuxième mode

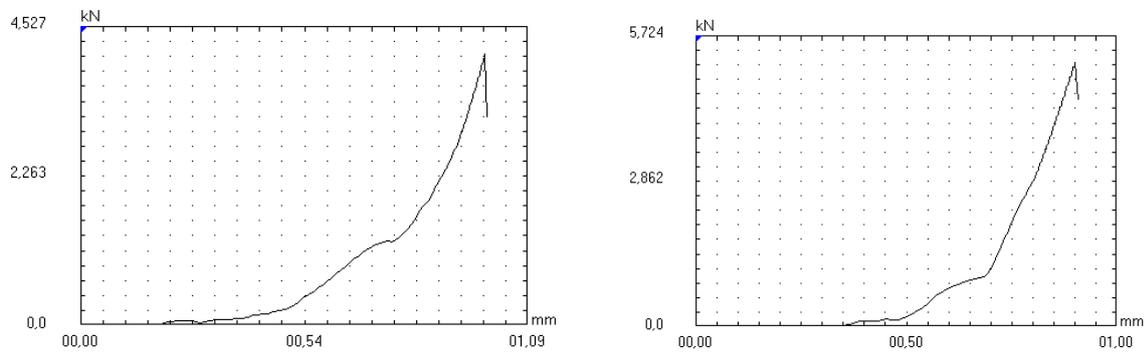


Figure V.14 : courbes contrainte déformation en flexion des bétons de deuxième mode a 2 et 28 jours

Les figures V.11 et V.13 représentent l'évolution des résistances en compression et en flexion en fonction du temps successivement. Alors que les figures V.12 et V.14 elles représentent les contraintes déformation en fonction de la force exercé. Vu les résultats, il bien clair que la NS a importé des améliorations pour les résistances en compression et en flexion a 2 et a 28 jours en comparant avec le témoin. Les améliorations sans croissante, les résistances augmentes en fonction de l'âge et même avec l'augmentation des dosages en NS.

V.2.3.3 Comparaison des résultats :

Caractéristique		Résistance mécanique (MPa)			
		Résistance à la Compression		Résistance à la flexion	
Age		2j	28j	2j	28j
BT		70	83	7.40	9.86
MI	1%	72	85	10.30	9.20
	2%	77	90	11.5	10.5
	3%	70	80	10.15	9.1
MII	1%	83	102	8.65	12.10
	2%	84	106	8.89	12.30
	3%	87	112	9.66	12.40

Tableau V.7 Résultats des essais mécaniques

V.2.3.3.1 Compression :

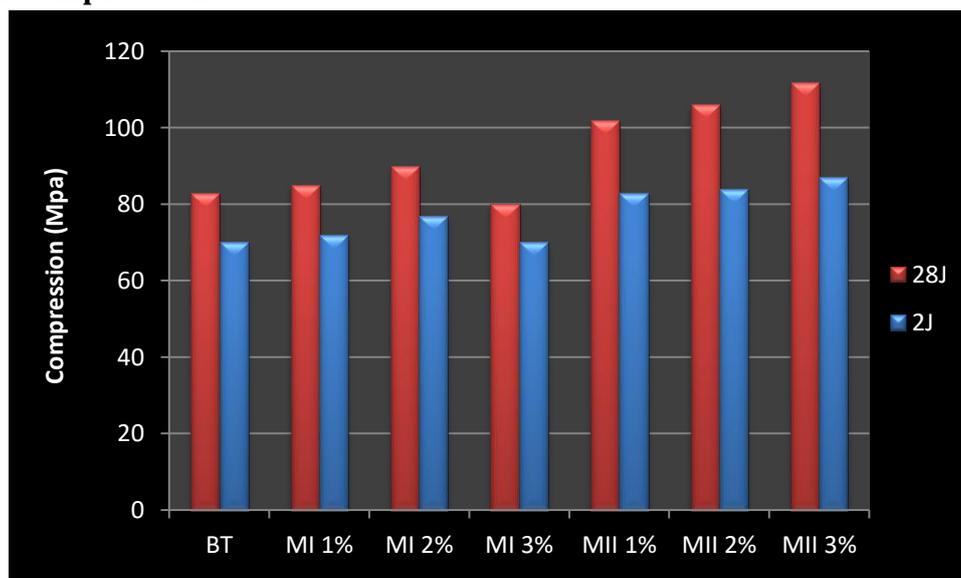


Figure V.15 : comparaison des résultats a la compression des bétons

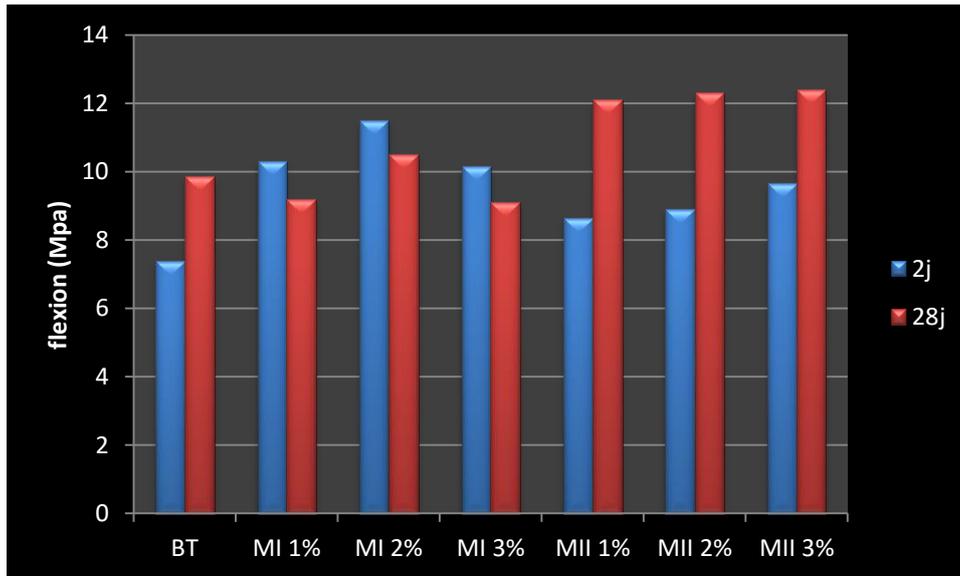


Figure V.16 : comparaison des résultats a la flexion des bétons

Les figures précédentes représentent une comparaison entre les résultats obtenus des bétons à 2 et 28 jours. À 2 jours on remarque que les résultats notés favorisent le 2^{ème} mode en compression et le 1^{er} mode en flexion, alors qu'aux 28 jours les résultats obtenus favorisent le 2^{ème} mode clairement que ce soit en compression ou en flexion. Sachant que techniquement et économiquement le 2^{ème} est favorable.

CONCLUSION GENERALE

Le but principal de ce travail, était l'étude de l'effet de l'introduction de la nanosilice (NS) dans les bétons fibrés haute performances en tant qu'ajout cimentaire par substitution partielle de ciment (en poudre), et en solution dans le super-plastifiant sur les propriétés à l'état frais et durcie. D'après les résultats obtenus, il en résulte que :

- La fluidité des BFUHP a diminuée lorsque la NS est utilisé en poudre par substitution d'une part de ciment à cause de sa finesse très élevée. Par contre, la fluidité de ces bétons est améliorée lorsque la NS est utilisés dans le superplastifiant.
- Il est à noter aussi qu'un dosage de superplastifiant supplémentaire pour avoir une fluidité adéquate aux bétons étudiés à base de la NS en poudre. Cependant, une réduction de ce dosage pourrait être obtenue pour une même fluidité quant la NS est utilisé dans le superplastifiant.
- Les résultats de la mesure des masse volumique ont montre qu'aucun changement ou variation n'a été observée, car l'utilisation de la nanosilice était de faible quantité et la mise en œuvre des bétons était aussi la même quelque soit le mode d'introduction de cette ajout. En effet, les valeurs enregistrées étaient de l'ordre 2368 Kg/m³.
- Les résultats des essais d'étalement au mini-cône des BFUHP étudiés on presque le même étalement puisque on chercher à l'avoir comme c'est citait.
- Les résultats des tests mécaniques ont montrés que le développement des résistances des bétons (en compression ou flexion) en fonction d'âge durcissement, est une fonction croissante et que la résistance a augmentée en fonction d'âge pour tous les bétons quelque soit le mode d'introduction de la nanosilice. Cependant, il est en résulte que le mode d'introduction de NS en solution dans le SP semble très bénéfique par rapport au mode d'utilisation en poudre.
- La plus grande valeur de résistance en compression été de l'ordre de 112 MPa pour le dosage 3% de deuxième mode (en solution dans SP), et la plus faible valeur était de l'ordre 80 MPa pour le dosage en 3% de premier mode (en poudre par substitution).
- Etant donné que le deuxième mode d'introduction de la NS en solution dans le SP, qui a donné des meilleurs résultats (à l'état frais et durci des bétons), le problème

d'utilisation de la nanosilice dans les bétons en particulier les bétons spéciaux peut être résolu par son utilisation en solution avec le superplastifiant.

- Sur le plan économique, le deuxième mode d'introduction semble aussi bénéfique car il suffit d'utiliser une petite dose de la NS en solution dans le SP qu'un dosage élevé de cet ajout tout en augmentant le dosage de SP pour avoir une telle fluidité.